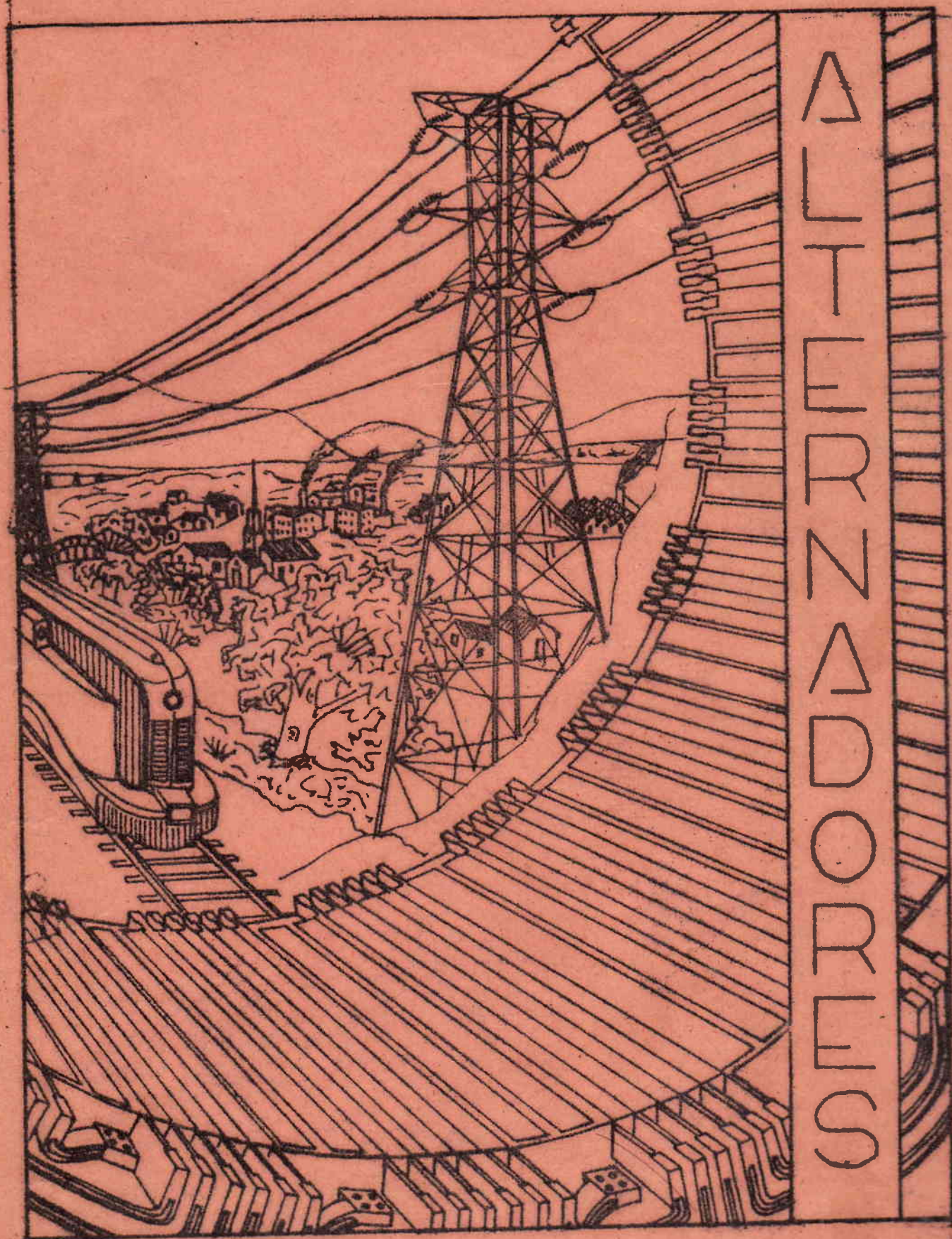


MAQUINAS SINCRONICAS

Prof. Ing. Agustín G. Cisa



Prof. Ing. Agustín G. Cisa

I ALTERNADORES

1. Los alternadores son las máquinas destinadas a la producción de corriente alterna. Están constituidos por una parte móvil y una fija, una de ellas puede ser el inducido, y la otra el inductor. Normalmente el inducido se aloja en la parte fija, solo se emplea el procedimiento contrario en pequeñas máquinas, que resultan así de una estructura similar a las de corriente continua. La generación en alta potencia se efectúa en trifásica y actualmente se llegan a las 200 MVA y aún más en una sola unidad, con una tensión de salida que rara vez pasa de los 13 KV. Los motores primarios son turbinas de vapor o hidráulicas. Con motores diesel o turbinas de gas, las máximas potencias alcanzadas por el momento son del orden de los 20 MVA.

2. Constitución

Esencialmente la máquina está constituida por el estator, construido en hierro silicio laminado, provisto de ranuras para alojar el bobinado inducido, y el rotor que lleva las bobinas inductoras que son recorridas por la corriente continua de excitación. Hay dos tipos de rotores; el de polo saliente y el llamado rotor liso o de entrehierro constante. En la figura 1 se da un esquema de una rueda tetrapolar de polos salientes y en la figura 2 de un rotor liso.

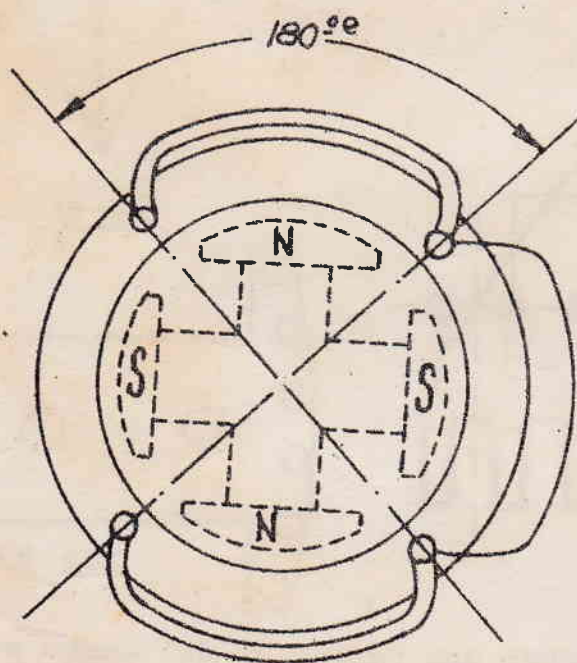


Fig. 1

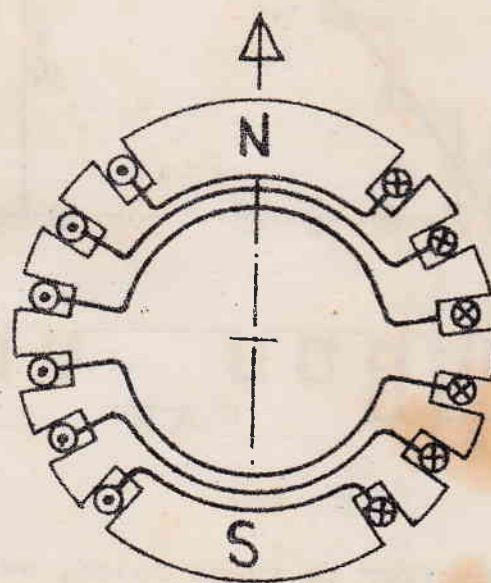


Fig. 2

En las ranuras del estator se aloja un bobinado trifásico distribuido del mismo tipo de las que ya se estudiaron a propósito de los bobinajes de las máquinas de corriente alterna. La corriente continua de excitación se hace llegar a las bobinas inductoras móviles por medio de anillos sobre los que se apoyan escobillas de carbón.

2.1 Amortiguadores

cobre o aluminio, alojadas en ranuras axiales practicadas en las expansiones polares, como se ve en la figura 3 y 3 bis. Dichas barras van eléctricamente unidas por dos anillos a cada lado de los polos.

Este elemento, que constituye una jaula de ardilla como en los motores de inducción, sólo actúa cuando la velocidad instantánea de la rueda polar difiere de la de sincronismo, produciendo el efecto de un amortiguador.

En las máquinas de rotor liso el efecto de amortiguamiento se obtiene por la misma masa metálica del rotor.

3. Campo inductor

En todos los casos se trata de que el campo de B en el entrehierro tenga una distribución lo más próxima posible de una sinusoide.

Si se trata de una rueda de polos salientes se recorta la expansión polar, figura 4 a tales efectos.

En el caso de rotores lisos se distribuye el bobinado inductor de modo de obtener una curva escalonada de H, de modo que la línea media de la inducción B en el entrehierro sea prácticamente sinusoidal; figura 5.

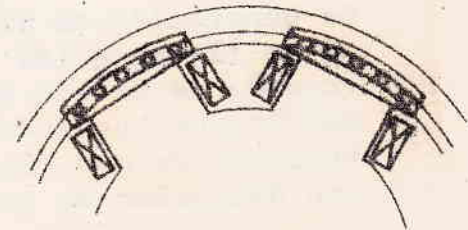


FIG. 3

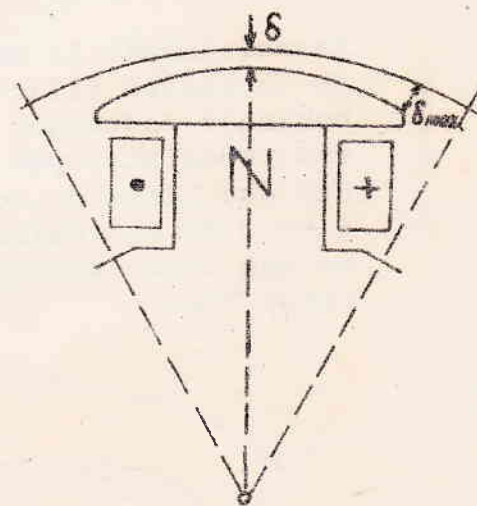


Fig. 4

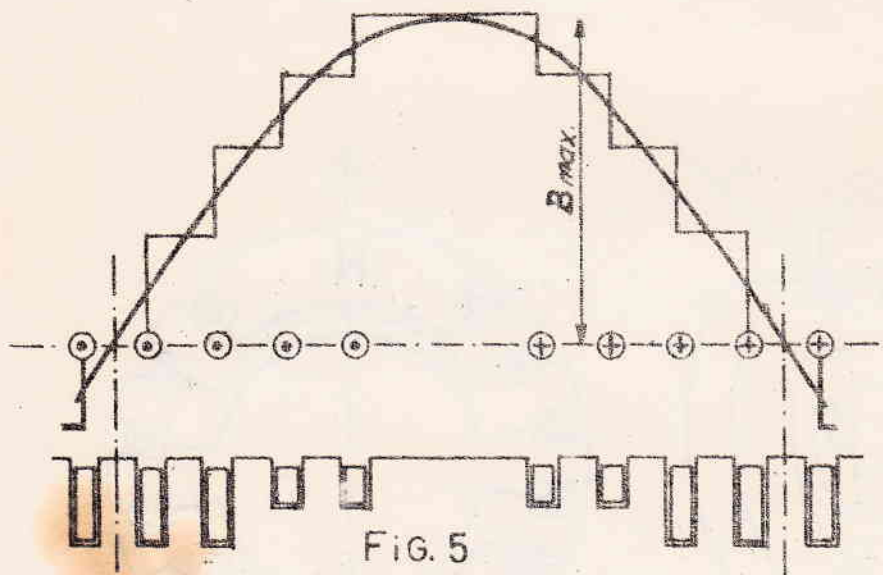


FIG. 5

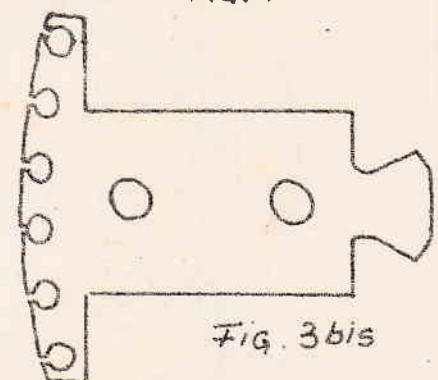


Fig. 3 bis

4. FEM

AL girar la rueda polar, se produce una variación del campo B en las espiras del inducido (estator) la que da origen a una fem eficaz cuyo valor es para la fundamental en una bobina diametral:

$$E = 4.44 N f \bar{\Phi}_M \quad \text{donde:}$$

N - número de espiras de la bobina diametral.
 $\bar{\Phi}_M$ - flujo máximo a través de la bobina.
 f - frecuencia.

Como por cada par de polos que pase frente a la espira, se cumple un ciclo, resultará:

$$f = \frac{p n}{60}$$

donde p - pares de polos
 n - r.p.m.

El flujo Φ_M corresponde al de la fundamental del campo B y será:

$$\Phi_M = \frac{2}{\pi} B_M l \zeta \quad \text{donde}$$

B_M - valor máximo de la inducción en el entrehierro en Wb/m^2 .

l - longitud axial útil del entrehierro en m.

ζ - paso polar en m.

4.1 FEM armónicas

Como la onda de B no es perfectamente sinusoidal, existirán fems armónicas que corresponderán a las armónicas del campo B. Como es simétrico con respecto al eje polar y además la semi-onda positiva es igual a la negativa; sólo existirán armónicas impares. La mencionada simetría se obtiene en base a una cuidadosa construcción mecánica y una perfecta ejecución de las bobinas excitadoras. Naturalmente que esto involucra una perfecta homogeneidad de los materiales magnéticos empleados.

Si r es el orden de la armónica, la fem en una espira diametral es:

$$E = 4.44 N f_r \Phi_r$$

donde Φ_r es el flujo de la armónica del campo B a través de la espira.

4.11 Factores del devanado

Consideremos el caso de q bobinas por polo y fase y de paso diametral Figura 6, conectadas en serie.

Se comparará el valor de la fem obtenida en este caso con el que se obtendría si las q bobinas estuvieran concentradas en una sola ranura por polo. Si en este último caso la fem es E , para cada bobina será:

$$E' = E/q, \text{ que será}$$

también la misma en el caso de que se hallen distribuidas pero se hallarán entre sí desfasadas un ángulo eléctrico γ . Obsérvese que si se colocaran una a continuación de otra, todas las fems generadas por todas las bobinas distribuidas bajo un par de polos, el polígono se cerraría y el ángulo al centro tomado por cada fem será $q\gamma$.

Para las q fems de cada polo y fase se tendrá: (ver fig.7) llamando R al radio del círculo

$$E' = 2R \sin \gamma/2$$

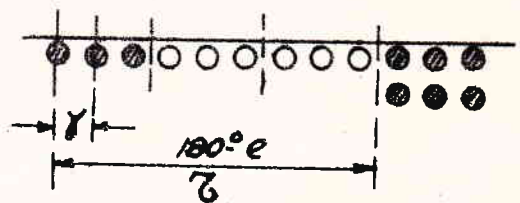


FIG. 6

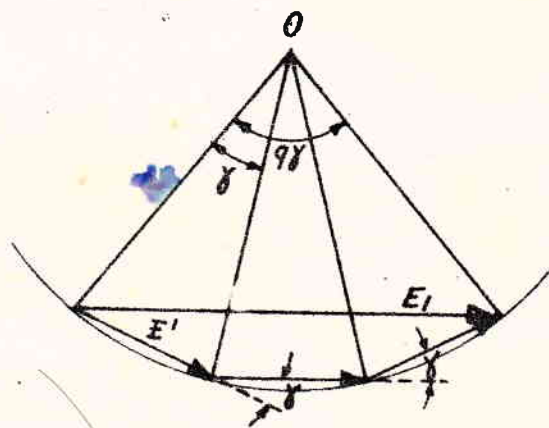


FIG. 7

$$\frac{E_1}{E} = \frac{E_1}{qE'} = \frac{\sin q\gamma/2}{q \sin \gamma/2} = K_d$$

El factor K_d , llamado de distribución, representa una reducción de la fem del total de espiras por hallarse éstas en bobinas distribuidas y no todas concentradas.

Para las fems armónicas, se tendrá el factor, multiplicando el ángulo γ por su orden

$$K_{rd} = \frac{\sin(rq\gamma/2)}{q \sin(r\gamma/2)}$$

Este factor tiende a un límite cuando q crece.

$$K_d = \frac{\text{cuerda}}{\text{arco}}$$

Para máquinas trifásicas se tiene:

$$q = r.p.f.$$

| | 2 | 3 | 6 | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,965 | 0,959 | 0,956 | 0,955 |
| 3 | 0,707 | 0,666 | 0,644 | 0,636 |
| 5 | 0,259 | 0,217 | 0,197 | 0,191 |
| 7 | -0,259 | -0,177 | -0,145 | -0,136 |

Como se ve en la tabla adjunta, K_d tiende a disminuir las armónicas altas.

4.1.2 Efecto del acortamiento de las bobinas

Si se compara la fem de una espira de ancho polar con la de una de menor ancho, acortada un ángulo ρ (fig. 8) se tendrá: considerando que la fem de la espira se halla formada por la suma de la fem e de cada uno de sus lados útiles

$$E = 2 e \cos \rho/2$$

$$\text{definiendo } K_p = \frac{E}{2e} = \cos \rho/2$$

que es el llamado factor de paso.
Para las armónicas se tendrá:

$$K_{pr} = \cos r\rho/2$$

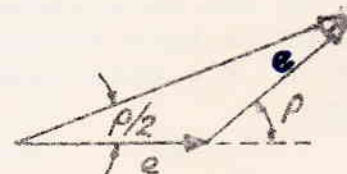
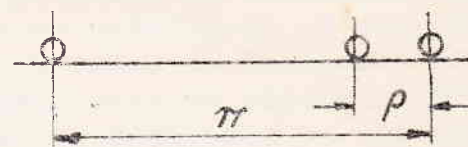


FIG. 8

este factor tiene fuerte influencia sobre las armónicas, por ej. la 5a. armónica puede reducirse a 0 con $\rho = 36^\circ$ o sea un ancho de bobina de $4/5$ y la séptima con un ancho de $6/7$. Tomando un valor promedio entre ambas se reducen fuertemente las dos.

4.1.3 Armónicas de ranura

Es evidente que hallandose ranurado el inducido, el campo B sufre alteración local, como puede verse en la fig. 9, mientras las ranuras corren bajo el polo, dicho campo no se altera, por lo cual su efecto se tomará en consideración en el análisis del campo principal.

No sucede lo mismo con las oscilaciones del campo que se producen cuando los dientes entran o salen de la expansión polar, ver fig. 10, cuyo efecto es el de la superposición de un flujo adicional pulsante en el tiempo sobre el campo principal que no pulsa.

La frecuencia f_s de tal pulsación es la fundamental por el número de ranuras por par de polos.

$$f_s = 2mqf$$

m - número de fases

q - número de ranuras por polo y fase.

El efecto de tal variación temporal del flujo puede tomarse en cuenta en forma bastante aproximada, considerando el flujo de la fundamental del campo más el debido a tal pulsación, de modo que el flujo vinculado con las espiras del inducido será:

$$\varphi = (\Phi + \phi \sin 2\pi f_s t) \cos 2\pi f t$$

que dará un fem:

$$e = 2\pi f N \Phi \cos 2\pi f t - \frac{\phi}{2} N \left[2\pi (f_s - f) \cos 2\pi (f_s - f) t + 2\pi (f_s + f) \cos 2\pi (f_s + f) t \right]$$

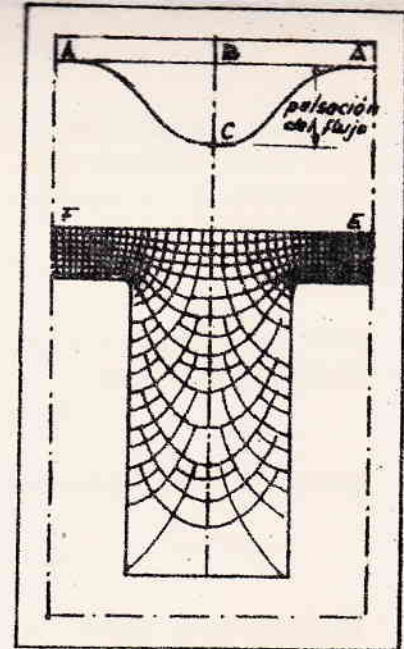
donde el primer término es la fundamental de la fem y el segundo representa el efecto de la armónica de diente.

Se ve que hay dos frecuencias $f_s - f$ y $f_s + f$.

Por ej. si hay 12 ranuras por par de polos, f_s da armónicas 11 y 13.

El efecto de tales armónicas se manifiesta notablemente cuando corren líneas telefónicas en las cercanías de las grandes líneas de transmisión de energía. Por tal razón se exige que los alternadores estén constituidos de manera que tal efecto sea mínimo. Se define en las normas el "factor de influencia telefónica" y se exige que la máquina no pase de ciertos límites.

En el diseño de la máquina puede reducirse mucho su producción tomando un número de ranuras que no sea múltiplo del n° de polos, lo cual conduce a los devanados de q fraccional. Otra solución consiste en el uso



Distribución del flujo en una ranura. **Fig. 9**

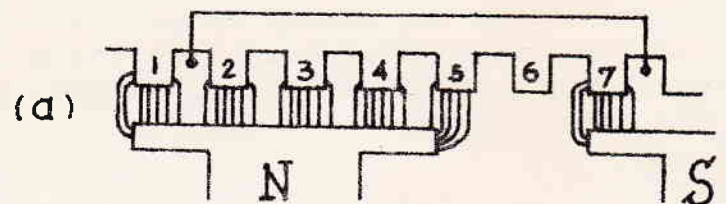
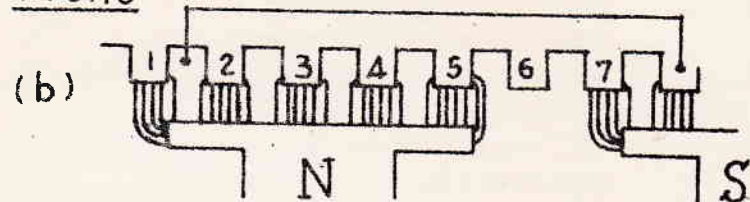
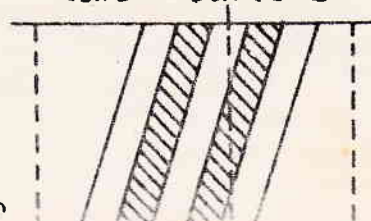


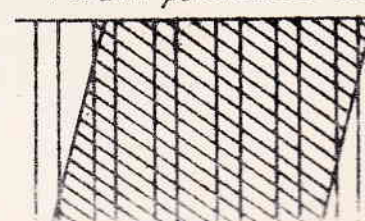
Fig. 10



Ranuras oblicuas



Piezas polares oblicuas



al uso de piezas polares también inclinadas fig. 11b.
Por otra parte los amortiguadores o las masas metálicas de rotor tienden a disminuir su efecto.

4.1.4. Valor eficaz de la FEM

Por lo visto sobre los factores K_d y K_p , la fem de la máquina deben escribirse:

$$E_1 = 4.44 N f \bar{\Phi} K_d K_p$$

para la fundamental, y para las armónicas:

$$E_r = 4.44 N f_r \bar{\Phi}_r K_{rd} K_{rp}$$

teniéndose como valor eficaz de la fem total de salida por fase:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + \dots + E_r^2 + \dots}$$

Es usual que para relevar la curva del campo en el entrehierro se coloque una bobina de prueba de paso diametral, la curva de la fem de esta bobina será idéntica a la forma del campo, si este no contiene armónicas pares. Si este las contiene, no aparecerán en esa fem, sí todas las impares.

4.1.5. FEM en función de corriente de excitación.

Girando la máquina a velocidad constante, la fem en bornes, en vacío, será función exclusivamente de la excitación. La curva $E(i_0)$ tiene la forma de la curva de inmantación, ver fig. 12

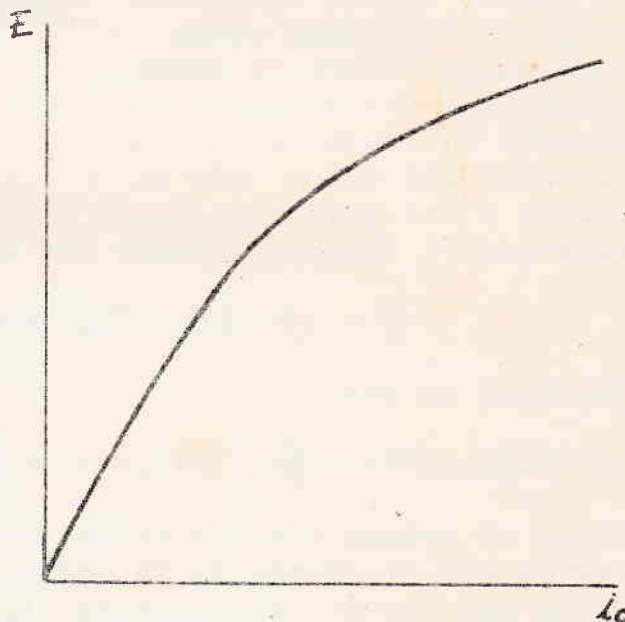


FIG. 12

5. Campo creado por el inducido

Cuando la máquina funciona conectada a un receptor simétrico, las corrientes generadas constituirían un sistema polifásico equilibrado que generará un campo giratorio en el entrehierro ya que el bobinado es polifásico y simétrico.

La velocidad de este campo giratorio será la misma que la del rotor y tendrá igual sentido, por lo que ocupará posiciones fijas con respecto a él, estas posiciones dependerán del desfase entre E e I , como se verá a continuación.

Supóngase que en determinado instante, la bobina bb' (fig. 13) ocupa la posición indicada en la figura. Esta bobina puede ser real

casos representará las q bobinas por polo de una fase y su eje será el de la fase. Eje A.

En el instante en que es tá representada, su fem será máxima y por lo tanto la de la fase a que pertenece. Si la corriente producida se halla en fase con E fem de la fase ($\psi = 0$), de acuerdo al teorema de Ferraris, el eje del campo giratorio \mathcal{Y}_a generado por todo el inducido pasará por el eje de la bobina bb' , es decir, sobre el eje q de la máquina.

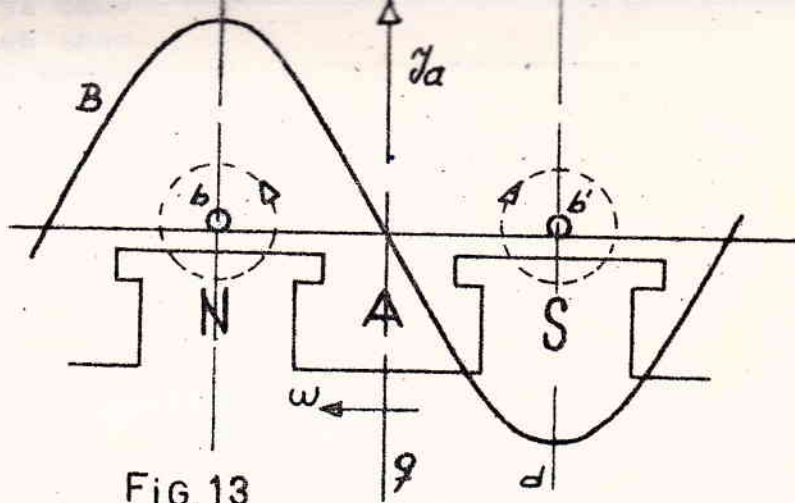


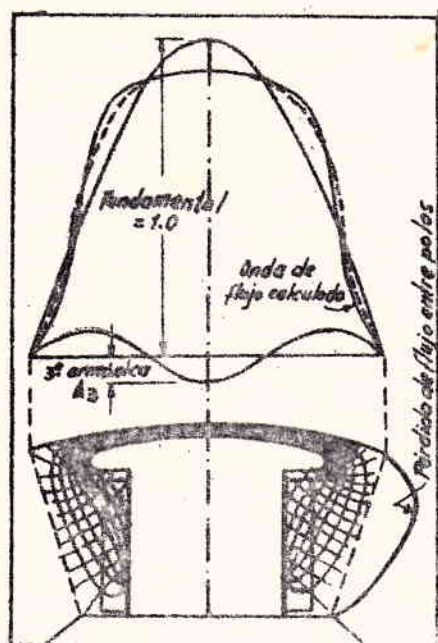
FIG.13

Supóngase ahora que la corriente se halla atrasada 90° con respecto a E. La corriente será ahora máxima un cuarto de período después o sea en el instante en que el polo sur se halla en A o sea coincidiendo con la dirección de \mathcal{Y}_a . Obsérvese que \mathcal{Y}_a será de sentido contrario al campo inductor.

Si la corriente estuviera en adelanto 90° (cargas capacitivas) con respecto a E, su máximo se produciría cuando el polo N pase por A, obsérvese que ahora \mathcal{Y}_a tendrá el mismo sentido que el campo inductor.

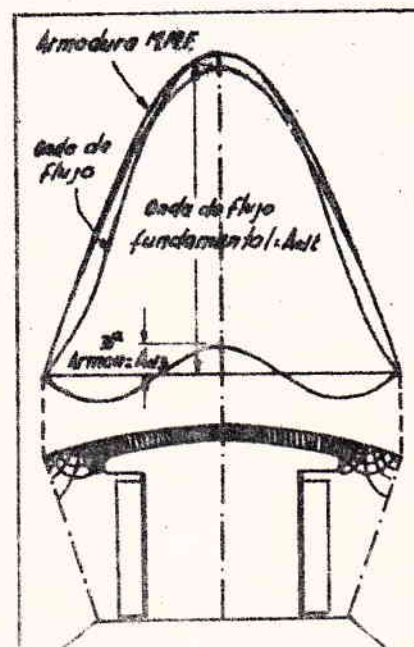
Como se ve por el análisis hecho, hay dos posiciones extremas para \mathcal{Y}_a , que difieren entre si 180° . Ocupará posiciones intermedias para los diversos valores de ψ entre $+90^\circ$ y -90° (self.-cap.)

La influencia de \mathcal{Y}_a sobre el funcionamiento de la máquina será distinta, si se trata de un alternador de entrehierro uniforme o de entrehierro discontinuo (polos salientes); en efecto: si el entrehierro es uniforme, la onda de amper- espiras \mathcal{Y}_a dará siempre la misma onda de B cualquiera sea su posición con respecto a la rueda polar, en cambio en el caso de polos salientes dicha onda de B cambiará fundamentalmente según la posición de \mathcal{Y}_a , como se ilustra en las figuras 14, 15 y 16. En la figura 15 se da la onda de B cuando el eje de la onda de \mathcal{Y}_a coincide con el eje directo d y en la fig. 16 cuando dicho eje coincide con el eje transversal q. Son estas las posiciones extremas de \mathcal{Y}_a .



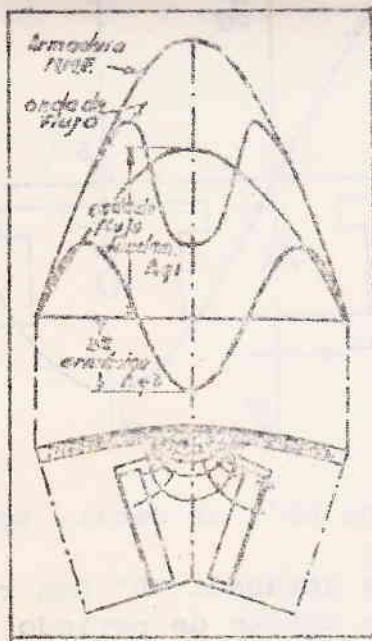
F.14

Solo se excita el inductor



F.15

Solo se excita el inducido



Distribución del campo B cuando se excita únicamente el inducido.
Ejes en cuadratura.

FIG. 16

En principio se basa el diagrama de Potier para la predeterminación del funcionamiento en carga.

Este análisis se refiere a las ondas fundamentales de amp. espiral. Como ambas ondas pueden contener armónicas de diversos valores, se explica la aparición de armónicas en carga, que no existen en vacío cuando sólo actúa uno de esos campos.

6.2 Caídas de tensión internas

La caída ohmica en los devanados del inducido será RI por fase. El valor de R es el obtenido en la medida con corriente continua, corregido según su temperatura y afectado de un factor (1 a 1.25) para tomar en consideración el efecto de la distribución no uniforme de la corriente alterna en las barras del devanado.

En las máquinas de poca potencia, bobinadas con hilos finos, este factor se acerca a la unidad, mientras que en las grandes unidades donde se emplean barras, dicho factor se acerca al máximo. Sin embargo al efecto del cómputo de las caídas de tensión tiene poca importancia ya que el término RI es pequeño frente a los otros y no vale la pena tomarla en consideración.

Las fugas magnéticas en las cabezas de las bobinas y en las ranuras del inducido, dan un campo que no se cierra en los circuitos magnéticos principales de la máquina, sino fundamentalmente en el aire, por lo que su flujo será proporcional a la corriente. Este efecto se tomará en cuenta como una caída de tensión jXI . Donde X es la reactancia de fugas por fase, del inducido.

Como se ve claramente en la fig. 15, la onda de B no difiere mucho de la del campo inductor, en cambio en el segundo caso, fig. 16, la onda aparece fuertemente deformada poseyendo una fuerte tercer armónica. Esta diferencia en los campos, que se ha analizado precedentemente, conduce a dos métodos fundamentales para tratar el comportamiento del alternador en carga, según sea de rotor liso o de polos salientes.

6. Funcionamiento en carga

Es evidente que en este caso coexistirán el campo principal y el creado por el inducido, por lo antedicho se analizará los dos casos separadamente.

6.1 Alternador de rotor liso.

Las ondas fundamentales de los campos de amp. esp. B_i y B_a podrán componerse, cualesquiera sea su posición relativa, para obtener una onda resultante B_r que será la excitación que excita la máquina y que dará así una fem resultante E_r' (fundamental). En este

6.3 Diagrama de Potier.

En 6.1 ya se definió la fem E_r resultante, de modo que para determinada condición de carga fijada por el receptor (simétrico) se tendrá

$$E_r = V + RI + jXI \quad (1)$$

$$Y_r = Y_i + Y_a \quad (2)$$

donde: V tensión de salida por fase
 Y_r amp. esp. resultantes

Las expresiones (1) y (2) son las llamadas ecuaciones de Potier. La (2) es vectorial y expresa la composición de las ondas fundamentales de amp. esp. siendo Y_r la resultante que da E_r a través de la curva de imantación (de vacío).

$$Y_a = \frac{2 m n N I \sqrt{2}}{K_d K_p}$$

Valor máximo de la fundamental en amp. esp. por polo

m - N° de fases

n - N° de bobinas por polo y fase

N - N° de espiras por bobina

podrá escribirse $Y_a = \beta I$

Y_i será también el valor máximo de la onda de amp. esp. del inductor, que según sea su devanado se expresará:

$$Y_i = m i_o \quad i_o = \text{corriente de excitación}$$

de modo que la (2) se podrá expresar:

$$\bar{I}_r = \bar{i}_o + \alpha \bar{I} \quad (2') \quad \alpha = \beta/m$$

Expresadas vectorialmente las ecuaciones (1) y (2') dan el siguiente diagrama: Fig. 17.

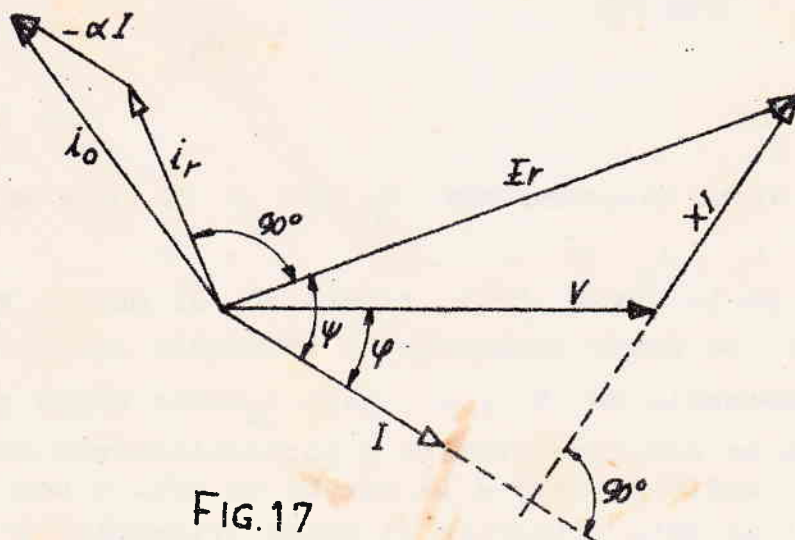


FIG. 17

Las constantes R, X y α se pueden obtener en base al proyecto de la máquina o experimentalmente mediante ensayos con la máquina ya construída. En ambos casos los resultados son aproximados; los errores en que se incurre son de distintos tipo. Por ejemplo en la determinación teórica de X resulta imposible hacer un cálculo exacto (recuérdese el cálculo de las reactancias de fugas de los transformadores) y más difícil aún es tomar en consideración como es afectado por el estado de saturación del hierro. Así también el coeficiente α se hallará afectado en su determinación teórica por las fugas de las bobinas y por ende la saturación.

En cuanto a la determinación experimental, que se verá a continuación, X y α no resultan constantes por efectos de la saturación debiendo tomarse un valor convencional.

6.4 Determinación experimental de X y α .

El procedimiento consiste en la realización del ensayo en devatado, o sea cargar la máquina por medio de reactancias de modo que el factor de potencia resulte muy bajo aprox. 0.1 o menos. El ensayo se efectúa a corriente constante variando la excitación de modo de obtener la curva $V(I)$. En la fig. 18 se ve tal curva.

Para un punto de ese funcionamiento el diagrama quedará como se indica en la figura 19.

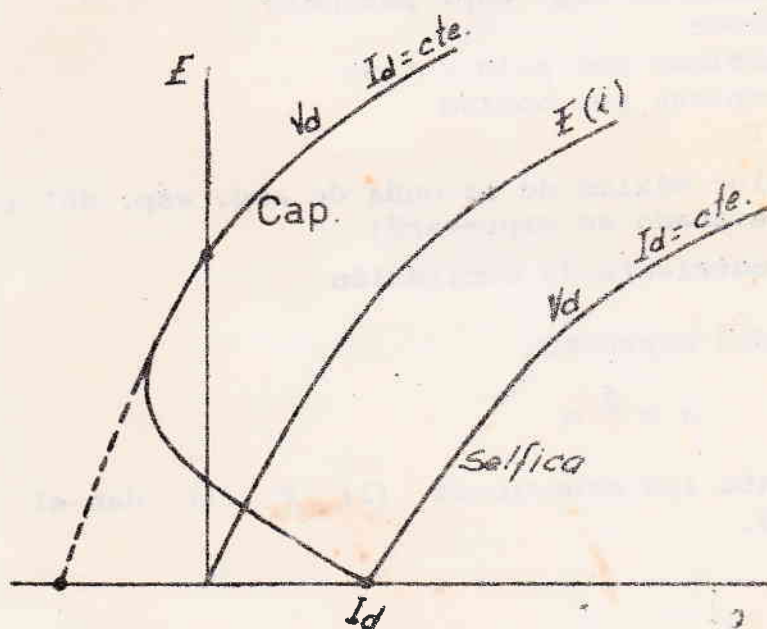


FIG. 18

Fig. 18

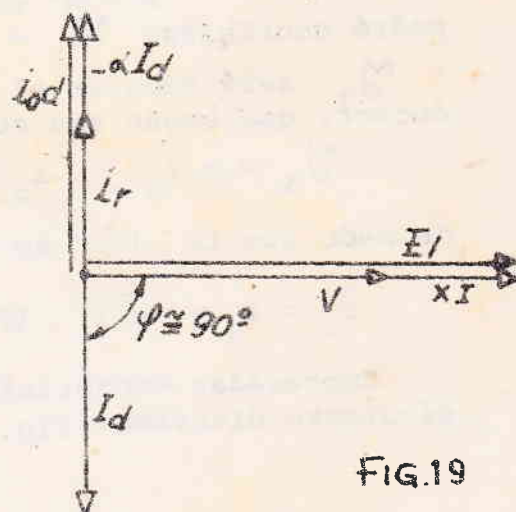
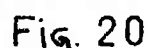


FIG.19

Fig. 19

Se ve en dicho diagrama que V_d , E_r y XI son colineales, lo mismo que i_o , i_r y αI .

Ubicando en la curva $E(i)$, figura 20, el punto $V_d(I_d)$ de i_{od} (punto C) se puede construir el triángulo recto abc admitiendo la constancia de X y α para $I_d = cte$; dicho triángulo generará la curva en devatado teórica y particularmente cuando se halle en $a' b' c'$ corresponderá a la marcha en c/c. o sea $V_d = 0$ (self-excitación nula) en esta situación el nuevo triángulo $a' c' d'$ será



Como se ve para esta determinación alcanza con un punto $V_d(I_d)$ para i_{od} y el punto de corto circuito c' para igual valor de I_d .

De todos modos es éste uno de los diagramas más exactos para la predeterminación de la característica en carga de los alternadores de rotor liso.

Manteniendo los bornes de salida en c.c. (figura 21) se toma I_{cc} (i_{ex}) llegando a valores de I_{cc} del orden de la nominal. Se comprueba que $I_{cc}(i_o)$ es una recta dentro de tales límites. Efectivamente si se tiene en cuenta que el ensayo en c.c. es una marcha en devatado sélfico, la reacción del inducido es directamente desmagnetizante cumpliéndose:

$$i_o = i_r + \alpha I_{cc}$$

Se hace notar que en el ensayo en corto circuito la corriente I_{cc}

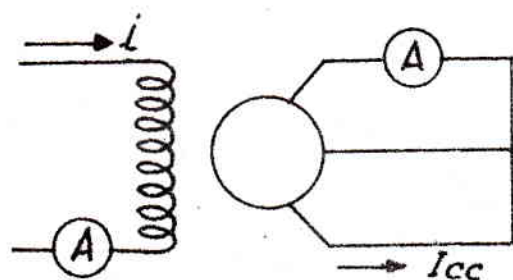


FIG. 21

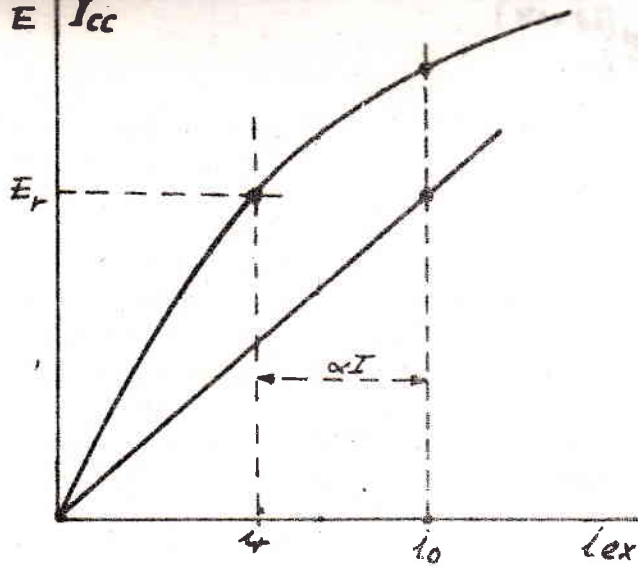


Fig. 22

será prácticamente independiente de la frecuencia, efectivamente

$$\frac{E_r}{X} = \frac{A_{\omega}}{L_{\omega}} = I_{cc}$$

Experimentalmente esto se comprueba muy bien.

6.6 Funcionamiento en devatado capacitivo.

Puede también hacerse el ensayo en devatado sobre cargas capacitivas, en este caso el diagrama será: Fig. 23.

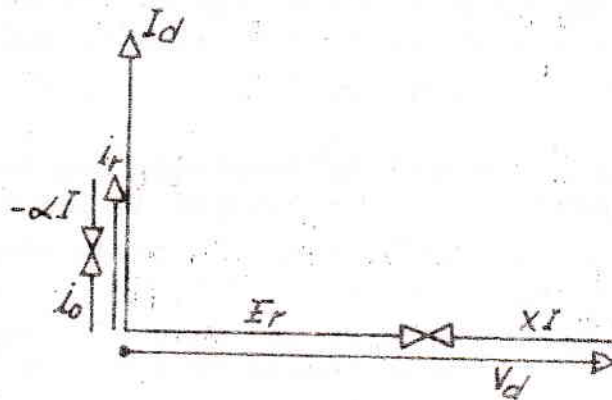


Fig. 23

Si se ubica tal punto en la planilla E(i), punto c ,

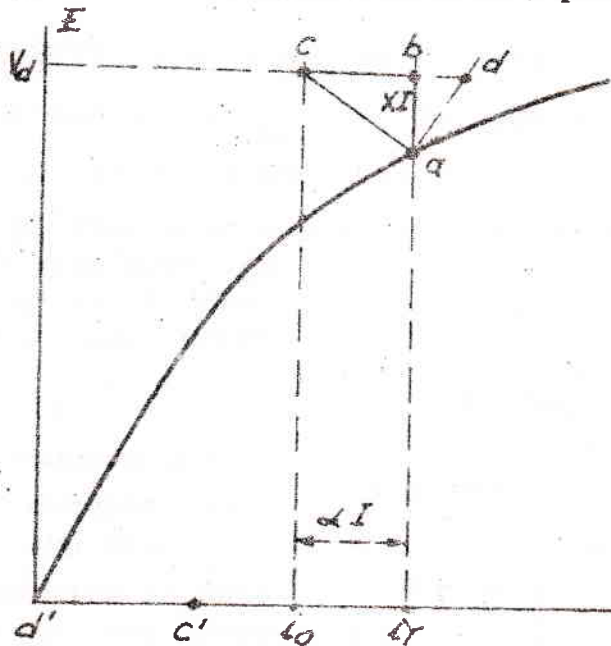


Fig. 24

la situación del triángulo de Potier será la indicada en la figura 24. Quedando la característica del devatado capacitivo por encima de la curva de vacío, este cortará al eje de E para $i_o = 0$, o sea da la posibilidad de autocebamiento. Si el ensayo se hace sobre conden-

sadores, como habrá que ir bajando X_c a medida que baja V_d y como la X de la máquina es constante, gradualmente el ensayo se transforma en sélfico teniéndose un andamento de la curva como el indicado en la figura 18.

Las curvas en devatado pueden relevarse haciendo marchar en oposición dos máquinas, la situación puede verse claramente en el diagrama de la figura 25 una máquina se halla sobreexcitada y la otra subexcitada, siendo $V_{d1} = V_{d2}$ en

magnitud. El ensayo se realiza muy fácilmente actuando sobre la corriente de excitación y controlando que no haya intercambio de potencia activa. (Fig. 25).

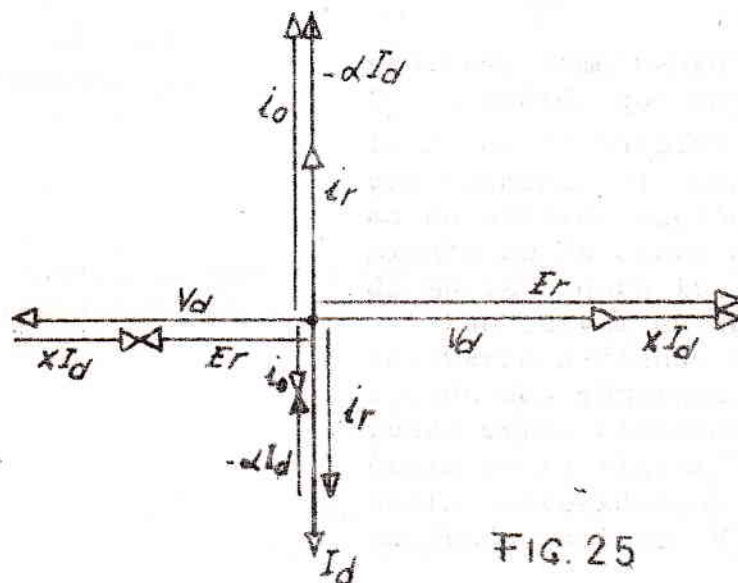


FIG. 25

6.5 Alternadores de polos salientes.

Las ondas fundamentales de \mathcal{M}_i e \mathcal{M}_a sólo podrán componerse cuando actúen ambas sobre el eje directo. En la figura 25 se ilustra el caso en que se excita solo el inducido (\mathcal{M}_a) en la posición de eje directo y en la fig. 14 cuando solo se excita el inductor (\mathcal{M}_i).

Para las demás posiciones actuarán sobre circuitos magnéticos diferentes no pudiendo componerse. En la figura 16 se ilustra el caso en que sólo se excita el inducido \mathcal{M}_a en la posición del eje. Obsérvese la fuente A3 que aparece.

Fuente 3ª armónica

Esto hace comprender las dificultades que se plantean en las posiciones intermedias de γ_a

6.6 Método de las dos reacciones de Blondel.

Para resolver el problema planteado, Blondel descompone γ_a en dos ondas, una que actúa en el eje directo γ_{ad} y la otra γ_{aq} que actúa en el eje transversal.

La onda γ_{ad} será generada por la componente de la corriente cuadratura con E_r o sea $I \sin \psi = I_d$ y la otra onda γ_{aq} por la componente $I \cos \psi = I_q$ (ver figura 26).

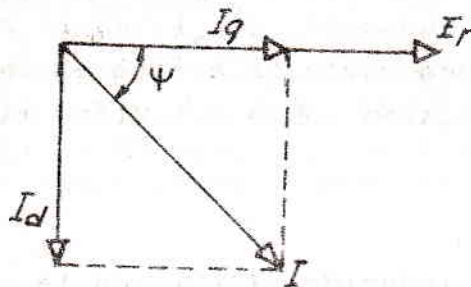


Fig. 26

Como γ_{ad} actúa en el mismo eje que γ_i se podrán componer simplemente mediante una suma algebraica:

$$\gamma_r = \gamma_i \pm \gamma_{aq} \quad (1)$$

el signo + corresponde a ángulo ψ en adelante, (capacitivo) y el de - a ψ en atraso. La excitación resultante γ_r dará la fem E_r .

La (1) podrá escribirse:

$$i_r = i_o \pm \alpha I_d$$

donde α es el coeficiente análogo al de Potier, y podrá determinarse mediante ensayo en devatado y corto-circuito como antes, ya que en ambos ensayos $\gamma_a = \gamma_{ad}$. Podrá también establecerse por cálculo en base a los bobinajes.

En cuanto al efecto de γ_{aq} , esta onda dará en el entrehierro una onda de B como la que se ilustra en la figura 16. Tomando la fundamental de esa onda y computando su flujo se hallará una reactancia ζ que dará una caída sélfica $j\zeta I_q$.

Como este campo tiene líneas con mucho recorrido en el aire, su flujo resultará prácticamente proporcional a I_q .

El efecto de las fugas del inducido se tomará en consideración en igual forma que en el diagrama de Potier. Lo mismo vale para las resistencias, aunque las caídas resistivas no vale la pena tomarlas en consideración, por ser muy pequeñas frente a las demás.

Se tendrán entonces las dos ecuaciones de Blondel:

$$E_r = V + j X I + j \zeta I_q \quad (2)$$

$$i_r = i_o \pm \alpha I_d$$

En la figura 27 se da una representación vectorial de la (2).

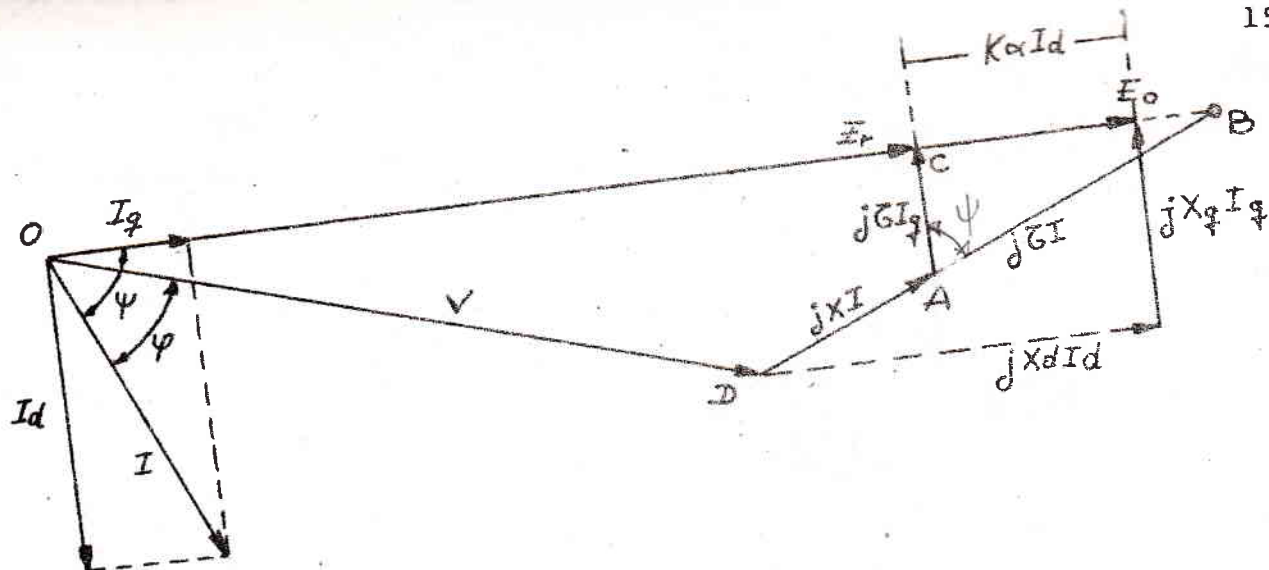


Fig. 27

Sobre la misma dirección de E_r puede colocarse E_o correspondiente a i_o . La diferencia entre E_o y E_r es segmento $K \propto I_d$. Donde K es la inclinación de la curva de vacío en la zona entre E_r y E_o .

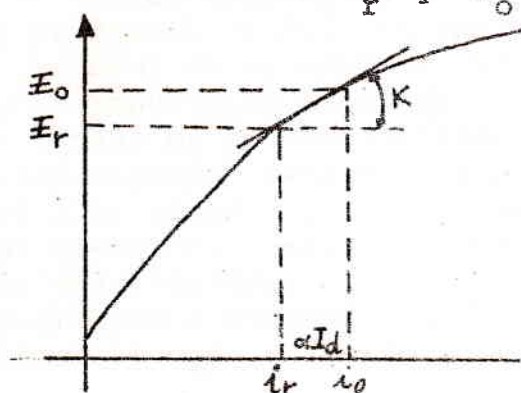


Fig. 28

6.5.1 Método de las dos reacciones

Como simplificación del procedimiento anterior se ha introducido un procedimiento llamado de las dos reacciones, directa X_d y transversal X_q .

Si desde la punta de V se traza $jX_d I_d$, que resultará paralelo a E_r , y luego $jX_q I_q$ hasta la punta de E_o podremos escribir:

$$XI \sin \psi + K \propto I_d = X_d I_d$$

$$XI \cos \psi + \zeta I_q = X_q I_q$$

$$X + K \propto = X_d \quad (1)$$

$$X + \zeta = X_q$$

Se ve que X_d y X_q no serán constantes dependiendo su valor del estado de saturación de la máquina.

En cálculos aproximados pueden considerarse constantes. El diagrama queda como en la figura 29.

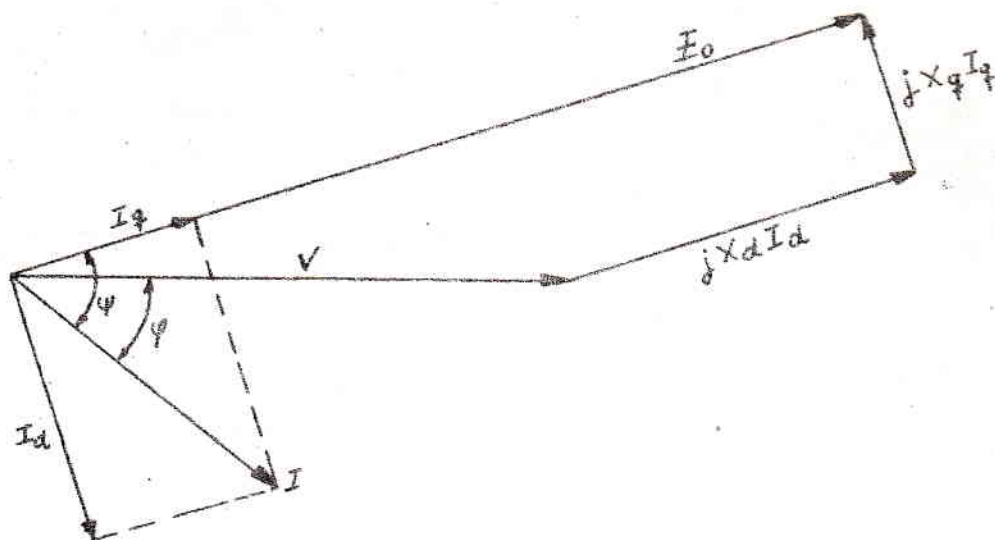


Fig. 29

6.5.2 Determinación experimental de X_q y X_d .

Es efectuada en la zona no saturada, $K = \text{cte}$; permite hallar \mathcal{C} y verificar α y X . A este fin se realiza el llamado ensayo de deslizamiento, que consiste en lo siguiente: Se conecta el inducido a una fuente trifásica, de una tensión V por fase relativamente baja con respecto a la nominal, de modo de estar seguro de no entrar en la saturación. Se hará girar el rotor, con su bobinado inductor abierto, a una velocidad ligeramente distinta de la de sincronismo (2 ó 3%) en esta forma el campo creado por el inducido pasará por todas las posiciones. Las posiciones en los ejes d y q quedarán bien individualizados por las indicaciones de los amperímetros u osciloscopio, correspondiendo el mínimo a I_d y el máximo a I_q de donde:

$$X_d = \frac{V}{I_d} \qquad X_q = \frac{V}{I_q}$$

Resultará $X_d > X_q$, lo que responde a que en el eje directo la reluctancia es mínima por corresponder a los circuitos magnéticos principales, en cambio en el eje q el circuito magnético toma un camino de mayor reluctancia (espacio interpolar).

En el caso de las máquinas de rotor liso $X_d = X_q$.

Una precaución a tomar en el ensayo de deslizamiento es conectar la tensión V del ensayo sólo cuando el rotor se halla en velocidad próxima al sincronismo. Efectivamente, siendo pequeña la velocidad relativa del campo y la rueda polar en sus bobinas la fem inducida será baja, de otro modo podría peligrar su aislación.

Existen otros procedimientos estáticos, para estas mismas determinaciones.

6.6 Procedimiento aproximado de Behn Eschenburg

Se le atribuirá a la máquina una única reactancia X_s determinada por el cociente

$$X_s = \frac{E_o (i_o)}{I_{cc} (i_o)}$$

donde E_o e I_{cc} corresponden a la misma corriente de excitación.

En la figura se ve claramente la dependencia de X_s de i_o ; por lo tanto para trabajar con este valor de la reactancia habrá que tomar su valor en la zona de i_o en que se prevé que trabajará la máquina. Este procedimiento se aplica a ambos tipos de máquinas.

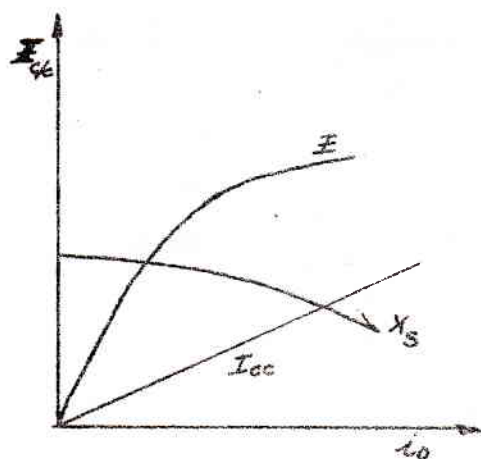


Fig. 30

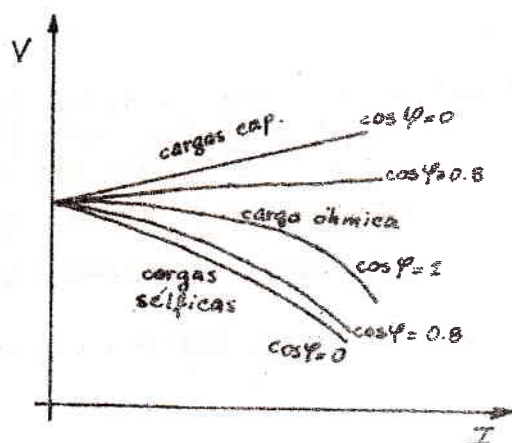


Fig. 31

7. Característica exterior.

Ya sea experimentalmente o por medio de los diagramas vistos se puede obtener la respuesta del alternador $V(I)$ a frecuencia fija y para determinadas corrientes de excitación. Estas características son fuertemente influenciadas por el factor de potencia del receptor. (Fig. 31).

8. Motores sincrónicos.

Todo alternador puede trabajar como motor sincrónico. En este caso, el campo giratorio creado por el estator conectado a la fuente polifásica correspondiente, arrastrará a la rueda polar, la que sólo podrá girar sincrónicamente. Esto se comprende fácilmente ya que para que exista un par constante, el campo giratorio y el de la rueda polar deberán hallarse inmóviles entre sí.

8.1 Diagramas de funcionamiento

Al considerarse el funcionamiento del motor sincrónico, por razones de sencillez y para poder tener una visión clara de todo su campo de trabajo se utiliza: o el procedimiento de Behn-Eschenburg, considerando la reactancia sincrónica X_s constante, o el de las dos reactancias X_d y X_q también ambas constantes.

8.1.1 Procedimiento de Behn-Eschenburg

La ecuación es: $V = E + jX_s I$

y el diagrama el que se ve en la figura 32.

La potencia de la máquina se expresa en función del ángulo δ entre V y E_o o sea en función de la posición de la rueda polar (E_o) con relación al campo giratorio representado por (V).

En el triángulo OAC se cumple:

$$E_o \sin \delta = X_s I \cos \varphi$$

luego la potencia es:

$$W = mVI \cos \varphi = m \frac{VE_o \sin \delta}{X_s}$$

donde m es el número de fases.

Por lo que antecede, el eje y representa el límite del funcionamiento estático del motor.

Fácilmente se ve que la zona superior a 0 se corresponde al funcionamiento como generador, pasando, en este caso, la corriente a zona derecha del eje y .

9.2 Teoría de las reacciones

El análisis anterior se aplica bien a las máquinas de rotor liso, en el caso de rueda de polos salientes, se obtienen mejores resultados utilizando la teoría de las dos reacciones.

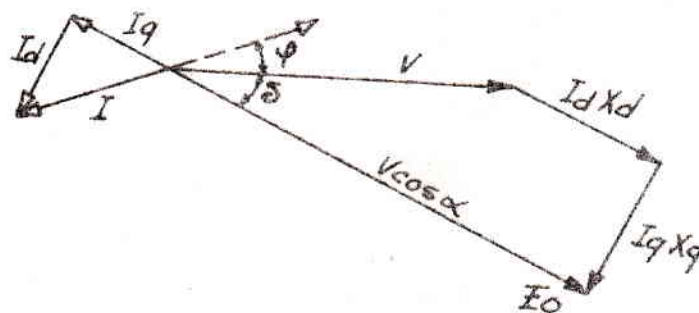


Fig. 33

En la figura se da el diagrama de funcionamiento del motor (corriente en adelante).

La potencia de entrada es: $W = (I_q V \cos \delta + I_d V \sin \delta) \text{ m}$

donde: $V \cos \delta = E_0 - X_d I_d$

$V \sin \delta = X_q I_q$

$$\text{luego: } W = \left[\frac{V E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2 \delta \right] \text{ m} \quad (1)$$

Restando a W , las pérdidas Joule en el inducido (mI^2R) y las de histéresis, Foucault y frotamiento, se obtiene la potencia útil en el eje del motor, a las que habrá que restar la potencia de la excitación si la excitatriz se halla en el mismo eje, con lo que se obtendría la potencia útil real disponible. Como el rendimiento de estas máquinas es elevado, el análisis puede continuarse con la expresión (1).

La expresión del par motor será:

$$C = W_p / \omega \quad \text{donde}$$

$$\omega = 2\pi / p f \quad p = \text{pares de polos}$$

La curva del par C en función de δ (posición de la rueda polar)

será la suma de dos sinusoides, como se desprende de la (1). La expresión hallada tanto vale para el caso de que la máquina es motor o es generador (no se hizo ninguna hipótesis restrictiva en este sentido). En la figura 34 se dan las curvas.

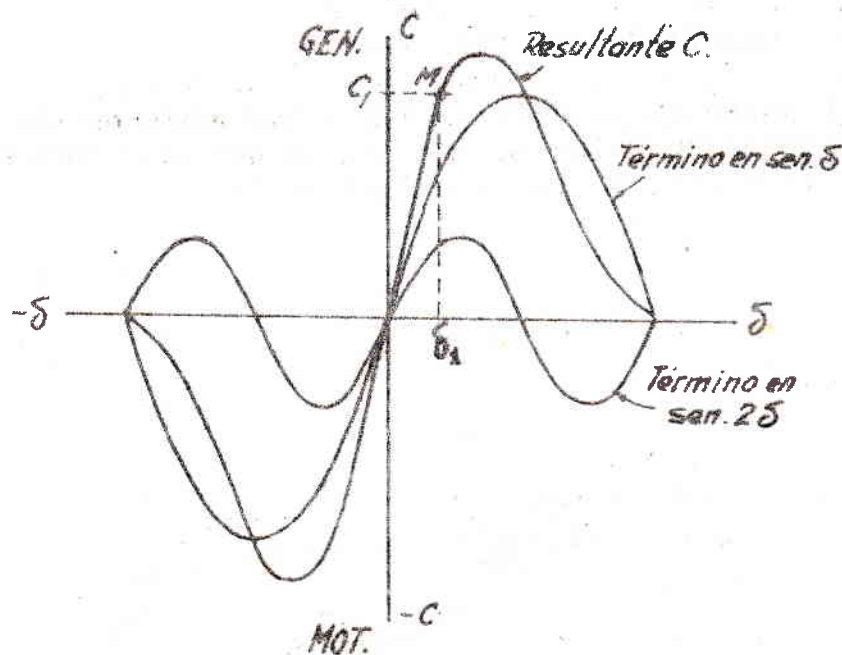


Fig. 34

En el caso de la máquina de rotor liso $X_d = X_q$, la ecuación (1) queda reducida al término en $\sin \delta$. Obsérvese que el término en $\sin 2\delta$ no contiene E_o , o sea que representa un par adicional debido a la saliencia de los polos, o sea a la variación de reluctancia de la rueda polar.

Existen pequeños motores sincrónicos como ser, relojes que funcionan sin excitación, basados en este principio.

9. Oscilaciones mecánicas de la rueda polar

La máquina sincrónica gira a velocidad media constante, pero sus velocidades instantáneas varían, ya sea por efecto del par motor no constante o cada vez que por efecto de las variaciones de carga la rueda polar debe cambiar de posición. Esta se comportará como un sistema oscilante alrededor de ω/p de sincronismo.

A continuación se estudian estos fenómenos.

9.1 Par sincronizante

Cuando se considera pequeñas oscilaciones temporales de la rueda polar, alrededor de un punto de funcionamiento M (figura 34) a velocidad media constante, habrá que considerar la expresión:

$$\frac{dC}{d\alpha} \quad \text{donde } \alpha \text{ rad. mec.} = p\delta$$

lo que da:

$$\frac{dC}{d\alpha} = \frac{p^2}{\omega} \left[\frac{V E_o}{X_d} \cos p\alpha + \frac{v^2 (X_d - X_q)}{X_d X_q} \cos 2p\alpha \right] m$$

Expresión que puede considerarse constante alrededor del punto $M(C_1 \delta_1)$ con $\delta_1 = p\alpha_1$, luego

$$\frac{dC}{d\alpha} = K_2$$

Siendo α pequeño, puede escribirse:

$$C_s = K_2 \alpha$$

que es la expresión corriente del par sincronizante, que se usará en la ecuación de la oscilación mecánica de la rueda polar.

9.1.1 Par de amortiguamiento

Este proviene del efecto de las barras del amortiguador o de la masa metálica de la rueda polar cuando ésta es lisa. Durante la oscilación se produce un deslizamiento con respecto al campo giratorio, el efecto resulta igual al de un motor de inducción.

Considerando la parte rectilínea alrededor de $g = 0$, de la curva $C(g)$ del amortiguador, puede escribirse:

$$g = \frac{1}{\omega_m} \frac{d\alpha}{dt} \quad \omega_m \text{ velocidad mecánica sincrónica}$$

$$\frac{dC}{dq(g=0)} = K \text{ o sea: } \frac{K}{\omega_m} \frac{d\alpha}{dt} = dC = K_1 \frac{d\alpha}{dt}$$

9.1.2 Par resistente o par motor.

Las máquinas sincrónicas giran a una velocidad media $\Omega_m = \omega/p$ constante, si son alternadores podrán ser arrastrados por motores de par constante (turbinas hidráulicas o térmicas) o de par variable en el tiempo (motores Diesel u otros de pistón). En forma similar sucede con los motores sincrónicos cuyo par resistente aplicado al eje puede ser constante (p. ej. bombas centrífugas) o variable (p. ej. compresor de pistón).

La parte variable de dichos pares, $C_m - C_i$, se expresará

$$\sum_{h=1}^h C_h \sin(h \Omega_m t)$$

donde h es el orden de la armónica

C_m es el par medio C_i par instantáneo

C_h amplitud de la armónica

9.1.3 Ecuación del fenómeno

Si el par motor o resistente es uniforme, de acuerdo a lo visto, se tendrá:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + K_1 \frac{d\alpha}{dt} + K_2 \alpha = 0$$

si la máquina se halla conectada a una red de potencia muy grande.

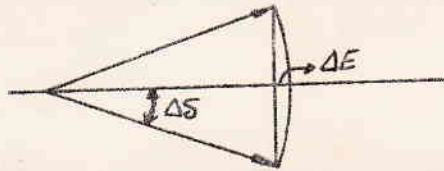
Si se halla sola K $\alpha = 0$. El movimiento será siempre oscilatorio amortiguado ya que $^2 K$, resulta pequeño debido a la dificultad de construir amortiguadores muy potentes.

El período será:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{4 J^2}{4 J K_2 - K_1^2}}$$

Caso de dos máquinas iguales acopladas.

Cada máquina se moverá instantáneamente en sentido contrario, apartándose las fems $p\Delta\alpha = \Delta\delta$ dando una variación de



$$\Delta E = E(1 - \cos \frac{\Delta\delta}{2})$$

En el caso de no haber amortiguamiento se mantendrá como una oscilación de la tensión.

9.1.4 Ecuación general.

De acuerdo a lo visto, ésta será:

$$J \frac{d\Omega'}{dt} + K_1 \Omega' + \int_0^t K_2 d\Omega' = \sum_{h=1}^{h=h} C_h \sin(h\Omega_m t + \varphi)$$

en la que Ω' es la velocidad pendular.

En general puede tomarse sólo la primer armónica del par. En este caso, en régimen:

$$\Omega'_{\text{máx.}} = \frac{C_1}{\sqrt{K_1^2 + \left(J h \Omega_m - \frac{K_2}{h \Omega_m}\right)^2}}$$

y el apartamiento angular mecánico correspondiente

$$\alpha_m = \frac{1}{h \Omega_m} \Omega'_{\text{máx.}}$$

En algunos casos es conveniente calcular la velocidad pendular y el ángulo α durante el transitorio inicial, por ejemplo al conectar la válvula de un compresor accionado por motor sincrónico, este dependerá del valor de φ para $t = 0$. En la figura 35 se da una curva completa para el caso de un compresor.

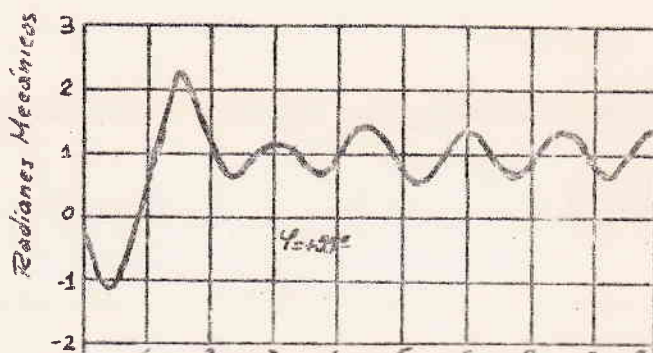


Fig. 35

9.1.5 Factor de resonancia

Se define:

$$F_r = \frac{\text{apart. áng. max. con corriente sincronizante}}{\text{apart. áng. máx. sin corriente sincronizante}}$$

despreciando K_1 , efecto del amortiguador

$$F_r = \frac{h^2 \cdot \Omega_m^2}{h^2 \cdot \Omega_m^2 - \frac{K_2}{J}}$$

como $\Omega_p = \sqrt{\frac{K_2}{J}}$

$$F_r = \frac{h^2 \cdot \Omega_m^2}{h^2 \cdot \Omega_m^2 - \Omega_p^2}$$

pasando a frecuencias:

$$F_r = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2}$$

donde f es la frecuencia del par perturbador y f_p la frecuencia propia.

En la figura 36 se representó la curva de los valores absolutos de $F_r (f_p/f)$. Se puede trabajar en las zonas 1 y 3. Sin embargo, como el par sincronizante que se consideró constante, es en realidad decreciente con δ con lo que f_p disminuye, lo que hace que el punto de trabajo se desplace hacia la izquierda. Si este se halla en la zona 3 se corre el riesgo de acercarse demasiado a la zona 2. En la zona 1 no existe tal riesgo.

Cuando se desea acoplar un motor primario a un alternador, habrá que adaptar la constante de inercia del volante, para ponerse en las condiciones enunciadas antes. Ya que otros parámetros son muy difíciles de modificar en máquinas ya construidas. Podría pensarse en el proyecto de la máquina en el aumento del par de amortiguación para suprimir el efecto de la resonancia, pero en primer lugar es muy difícil llegar a altos amortiguamientos por razones constructivas y por otro lado no es conveniente, ya que se perderá la oscilación mecánica y el volante perdería su efecto fundamental de regularizar al par motriz.

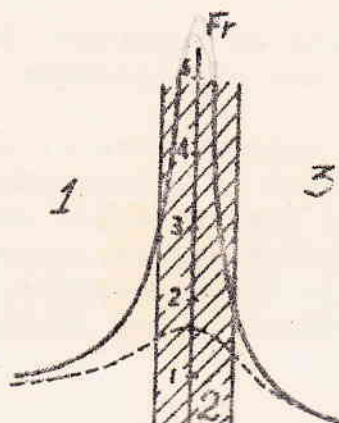


Fig 36

10. Sistemas de excitación.

Son muy variados. Los pequeños alternadores se construyen a veces en la misma forma que las máquinas de corriente continua, es decir, con inductores fijos e inducido giratorio. En ese caso la corriente se tomará del inducido por medio de los anillos que se ven en la derecha de la figura 37.

Las mismas ranuras del inducido llevan un devanado suplementario de corriente continua, cuyo colector se ve a la izquierda. La corriente continúa así producida se utiliza para alimentar los inductores. Se trata pues de un alternador cuyos inductores están excitados por una máquina serie que tiene los mismos inductores. La corriente i_0 de excitación del alternador se regula con el reóstato R . Este sistema es bueno para trabajo en régimen, pero no para ensayos. En efecto, en los ensayos a bajos valores de i_0 , la máquina llega a la resistencia crítica y se desceba, dejando de funcionar el alternador. En un ensayo en demagnetizado sélfico, como I está 90° detrás de E produce un fuerte efecto desmagnetizante que puede descebar también la máquina, el mismo efecto se tiene en los ensayos en cortocircuito.- Por estas razones con cargas sélficas amplifica las caídas de tensión.

En las máquinas más potentes la excitación es suministrada por una máquina auxiliar generalmente acoplada al eje de la principal y que se llama excitatriz (fig. 38). Para regular la excitación del alternador no se intercala un reóstato en la excitación de éste, pues tendría que ser de enormes dimensiones, dado lo elevado de la corriente de excitación. Además se perdería en él una potencia apreciable. Lo que se hace es regular, con R la excitación de la excitatriz, que puede ser una máquina serie, shunt, etc.- Aquí el reóstato es menor pues i es del orden de 3 ó 4% de i_0 .

En las grandes unidades se emplean dos máquinas de c.c. montadas como se indica en el esquema de la figura 39.

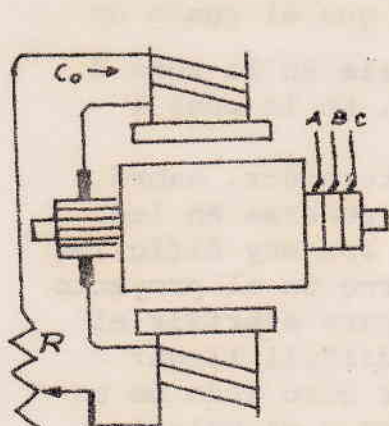


Fig. 37

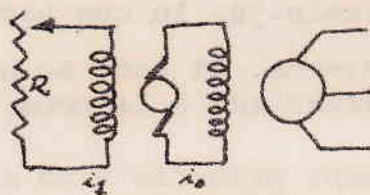


Fig. 38

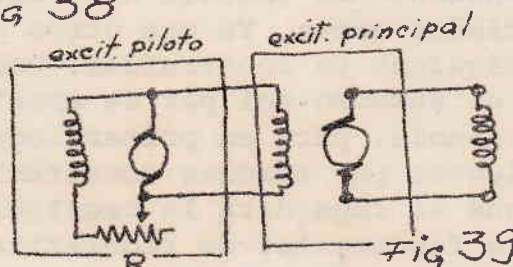


Fig. 39

La resistencia R es comandada por el regulador de tensión.

Actualmente se reemplaza las dos excitatrices por una amplidina o metadina.

Para evitar los peligros que entraña para el alternador un cortocircuito, se ponen relays que cortan la excitación en cuanto ocurre uno de ellos. Pero el interruptor que se emplea con este fin no ha de limitarse a abrir el circuito, pues en estos casos saltaría una enorme chispa debido a la gran self de los inductores, sino que se conectaría a éstos una resistencia de descarga que disipará la energía acu-

mulada en la self. Dicho interruptor estará constituido de modo que el contacto móvil C (fig. 40), conecte la resistencia de descarga antes de que abran los contactos principales AB.

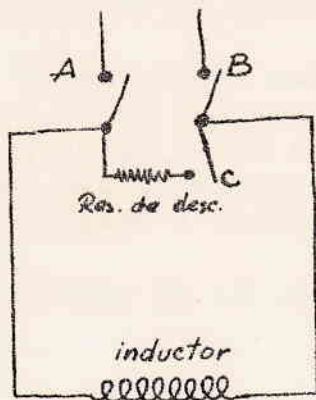


Fig. 40

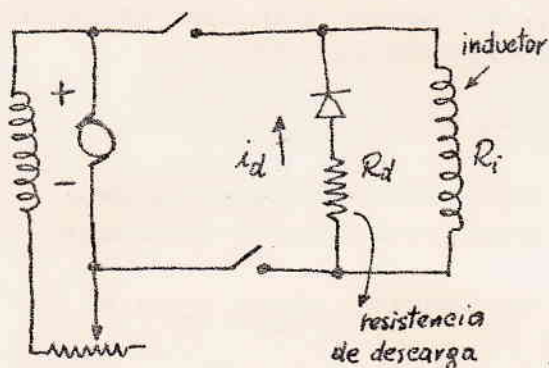


Fig. 41

En las máquinas de pequeño tamaño se monta un diodo, como se indica en el esquema de la figura 41, al efecto de reemplazar el interruptor antes descripto.

Con respecto a la resistencia de descarga debe advertirse que su uso es de gran importancia, ya que la desconexión del inductor de gran self provoca en sus bornes una elevada tensión que pone en peligro su aislación, al punto que la perfora después de varias operaciones.

Si la corriente es $i = \frac{V}{R_i}$ antes

de la desconexión y si la resistencia de descarga es R_d , aparecerá en bornes del inductor en el primer instante una tensión $-R_d i$. Esta tensión teórica queda siempre reducida por las corrientes parásitas en los núcleos magnéticos y el amortiguador. En la fig. 42 se dan curvas experimentales del fenómeno real, en las que el parámetro es $R_d/R_i = K$

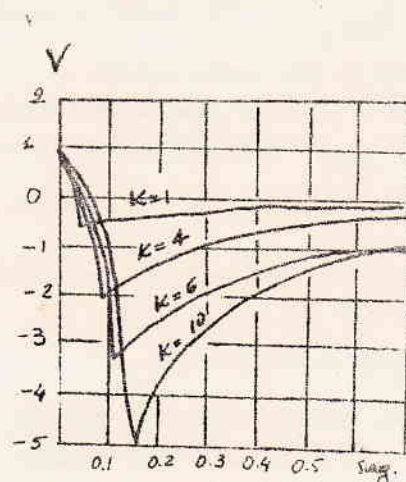


Fig 42

11. Rendimiento

Hay varios métodos para la determinación del rendimiento de un generador, los que se pueden clasificar en dos grupos:

a) Directos: se hace trabajar el generador a plena carga, media carga, etc., midiendo en cada paso la potencia mecánica que se le suministra y la eléctrica que entrega. Este ensayo, que es el verdadero juez del rendimiento de la máquina, tiene el inconveniente de que requiere desperdiciar energía, por lo que se suele recurrir a métodos indirectos.-

b) Métodos indirectos: por separación de pérdidas. Si el generador es trifásico el rendimiento será:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} VI \cos \varphi}{\sqrt{3} VI \cos \varphi + P_{HFf} + 3RI^2 + r i_o^2}$$

donde R es la resistencia de cada fase del devanado y r la resistencia de los inductores.

Ambas resistencias pueden medirse por el método voltamperimétrico. P_{HFf} son las pérdidas por histéresis. Foucault y frotamiento de la máquina y su excitatriz. Para determinar este valor podemos hacer funcionar el generador en vacío con excitación, arrastrándolo con un motor tarado, siendo P_{HFf} igual a la potencia entregada por éste.

$$P_H = K_1 B^{1.6} n ; \quad P_F = K_2 B^2 n^2 \quad P_f = K n$$

Como el generador debe ser movido a la velocidad de sincronismo; el B debe ser el mismo que en el régimen cuyo rendimiento queremos determinar.

A ese efecto recordemos que en régimen se tendrá: $i_r = i_o + \alpha I$ y los ampers-vuelta son: $N i_r = N i_o + N \alpha I$

En cambio en vacío los ampers-vuelta serán $N i_o'$. Para que el B se conserve debe ser:

$$N i_o' = N i_o + N \alpha I ; \quad i_o' = i_o + \alpha I$$

Si la excitatriz está conectada al mismo eje que el alternador, sus pérdidas quedarán incluidas en P_{HFf} . Si está separada será preciso avaluarlas y agregar este término a la expresión. Si es posible tarar la excitatriz ésta puede ser utilizada como motor de arrastre.

También puede determinarse P_{HFf} utilizando el alternador como motor sincrónico conectándolo a una fuente de su misma frecuencia de trabajo.

Con esto quedará fijada la velocidad al valor conveniente. En cuanto a la excitación, se regulará de modo que i_r sea el mismo que en el régimen cuyo P_{HFf} queremos determinar.

Sólo en pequeñas máquinas con bobinados de hilos de poca sección puede utilizarse el valor de R medido en continua, que desde luego debe corregirse por la temperatura.

Cuando los bobinajes están realizados con barras, habrá que determinar las pérdidas ohmicas del inducido mediante ensayos. A este fin se presta muy bien el ensayo en c.c., utilizándose un motor calibrado o cuyas pérdidas se conocen. También dan muy buen resultado los ensayos de retardación.

12. Alternadores monofásicos.

En estos si consideramos a la fundamental de los ampers-vuelta en el entrehierro, se trata de un campo alternativo de distribución sinusoidal. El valor en un punto cualquiera estará dado por:

$$y = 0.9 N I \cos x \sin \omega t$$

que puede descomponerse en dos campos giratorios de igual velocidad ω y sentidos contrarios, que valen:

$$y_1 = \frac{0.9}{2} N I \sin (\omega t - x) ; \quad y_2 = \frac{0.9}{2} N I \sin (\omega t + x)$$

Uno de estos campos gira en el mismo sentido que la rueda polar, y a la misma velocidad que ella, dando lugar a los fenómenos que ya se estudiaron en los alternadores trifásicos. El otro cuya velocidad con respecto a la rueda polar será 2ω , induce en los bobinados inductores, f.e.m. de frecuencia 2ω ; la corriente de excitación llevará superpuesta una alterna de frecuencia 2ω . Lo mismo pasará con la corriente del inducido. Esta oscilación aumenta las pérdidas bajando el rendimiento.

Los alternadores monofásicos se usan para las pequeñas potencias.-

13. Arranque del motor sincrónico.

Existen dos maneras de hacer arrancar a un motor sincrónico. Arrastrándolo con un motor auxiliar o recurriendo al arranque asíncrono.

13.1 Arrastrándolo con un pequeño motor auxiliar.

Antes de exponer el dispositivo empleado, se dará una pequeña explicación teórica sobre la transición de generador a motor.

Sean las máquinas 1 y 2 (fig. 43). Si la 1 está funcionando como alternador, en paralelo con el generador 2 y se le disminuye el par, llega a girar como motor en vacío, girando siempre en la misma dirección (también puede decirse que marcha como generador en vacío que viene a ser lo mismo que si no tenemos en cuenta las pérdidas eléctricas y mecánicas). En este caso $V + E = 0$ (unas líneas más abajo veremos esto más claramente).

Luego, si se aplica un par resistente en el eje, marchará como motor en carga; en este caso E y V no tendrán una resultante nula sino que ésta valdrá E_1 y de acuerdo con la teoría de Behn-Eschemburg, será $E_1 = ZI$, pues así se tendrá $E + V = E_1$ o sea $V = -E + ZI$. La potencia P en el eje del motor será $E I \cos \theta$. Cuando $E_1 = 0$, se tiene la figura indicada siendo $ZI = 0$, $I = 0$, $P_t = 0$, vale decir, motor en vacío como adelantamos más arriba.

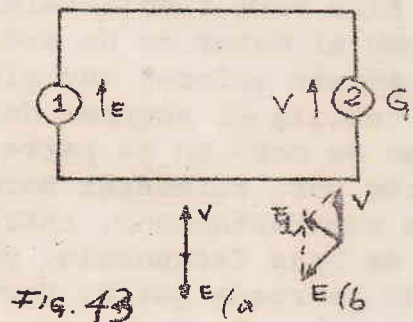


Fig. 43

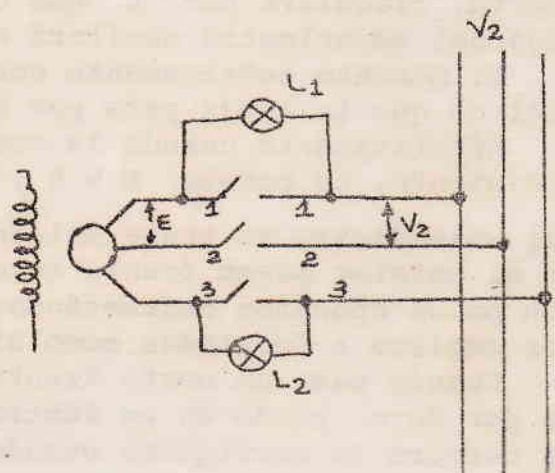


Fig. 44

Para efectuar el arranque se realiza el esquema de la fig. 44. Con el interruptor abierto se arrastra el motor síncrono (que está sin carga alguna y funciona como generador en vacío), con un pequeño motor auxiliar regulando la excitación hasta obtener que V_1 marque idéntico a V_2 , o sea $E = V$, mientras se trata de que la velocidad de arrastre sea lo más próxima que se pueda a la de sincronismo. O sea que la frecuencia f' de la E del motor coincida con la f de la V de la línea. Mientras no se obtenga la igualdad de las frecuencias, a las lámparas quedará aplicada una tensión alterna de amplitud $2V$ y de frecuencia $(f - f')$.

Cuando las dos velocidades estén muy próximas, la frecuencia de la alterna será tan baja que se verá a las lámparas prenderse y apagarse lentamente. Cuando el ritmo sea lo más lento que se pueda conseguir se cierran los interruptores al estar apagadas. A pesar de ser las velocidades algo distintas, el motor se engancha (se sincroniza). Para explicar esto asimilemos el motor similar a un pequeño imán sometido a un campo giratorio como hemos hecho antes. Sobre el inducido obrará un par: $C = H M \sin \alpha + (\omega - \omega') t$ cuya gráfica se ilustra en la fig. . Si la velocidad del inducido es inferior a la del sincronismo, basta un hemiciclo positivo del par para acelerarlo y llevarlo a ella. Si es superior, un hemiciclo negativo.

Este sistema de arranque es bastante engorroso y caro. Requiere el uso de un motor de arrastre, que debe ser de corriente continua para permitir una eficiente regulación de la velocidad. Y este motor requiere a su vez una fuente de c.c. para su alimentación.

13.2 Arranque asíncrono.

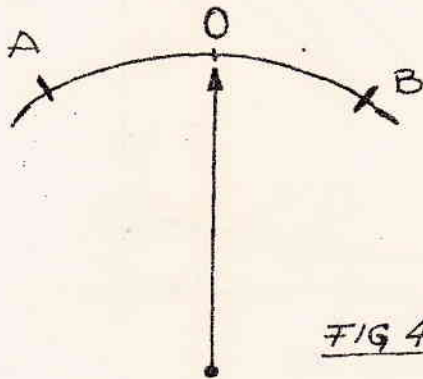
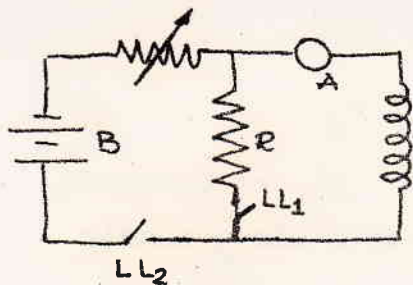
Los motores sincrónicos tienen según hemos dicho, amortiguadores cuya disposición es análoga a las llamadas jaulas de ardillas de los motores asíncronos, lo que se aprovecha para el arranque. Para arrancar se da tensión al inducido, pero sin excitar el inductor y sin carga mecánica en el eje. El motor arrancará en vacío como asíncrono girando a una velocidad de 3 a 4% menor que la de sincronismo. (Se aplica para este funcionamiento, sólo media tensión en el inducido, pues como el motor no ha sido calculado como asíncrono, la corriente podría asumir valores muy altos.

Se realiza el esquema de la fig. 45 donde A es un amperímetro del tipo de cero en la parte central de la escala, B es la fuente que sirve para alimentar normalmente los inductores. Cuando el motor trabaja como asíncrono, entre los bornes del inductor aparecerá una f.e.m. de baja frecuencia, ya que los polos del estator pasan frente a los de la rueda polar. Cerrando LL_1 mientras LL_2 permanece abierta, circulará por R una corriente debida a esa f.e.m. Y la aguja del amperímetro oscilará entre los límites A y B (fig. 45).

El momento teóricamente conveniente para dar excitación será aquel en que la aguja pasa por cero.

Efectivamente cuando la corriente es nula, siendo el circuito resistente, es porque $E = 0$, o sea $\frac{d\phi}{dt} = 0$. El flujo es máximo, vale decir, se trata del instante en que los polos que se forman en el estator pasan frente a los inductores. Y esa misma posición, con polos opuestos enfrentándose, es la que se tendrá cuando el motor empiece a funcionar como síncrono en vacío.

Cuando pasa un norte frente a los polos del rotor la aguja pasa por cero, yendo en un sentido y cuando es un sur en el contrario. Se cerrará la excitación cuando la aguja pase por cero caminando en



una dirección determinada, aquella tal que si se cierra la excitación resulten polos enfrentados pues de lo contrario se crearán polos inductores del mismo signo que los del inducido, con lo que el motor tenderá a atrasarse 180° eléctricos y se detendrá. La manera de conocerla es conectar la batería, cerrando LL_2 , cuando el motor está parado y ver para qué lado se desvía la aguja. Cuando ésta pase por cero, marchando en la misma dirección (el motor funcionando como asíncrono) se da excitación cerrando LL_2 y abriendo luego LL_1 . En realidad, como los campos tardan siempre algo en establecerse, conviene cerrar siempre con cierta anticipación: en el instante en que la aguja habiendo llegado al extremo de su carrera, empieza a desplazarse en el sentido ya indicado.

Una vez que el motor está funcionando como sincrónico, se sube la tensión al valor de la línea.

13.3 Este procedimiento de arranque es algo complicado, pero se presta muy bien a ser automatizado. Tiene la ventaja de no producir altas corrientes transitorias en el momento de la sincronización.

En otros casos de arranque asíncrono sólo se controla que la velocidad sea próxima a la de sincronismo y en ese momento se conecta el campo sin controlar el momento oportuno. Se demuestra que al alcanzar cierta velocidad, siempre se produce la sincronización, lo que podrá suceder es que el transitorio eléctrico será más o menos violento según el instante incontrolado del cierre de la excitación.

14. Acoplamiento de alternadores.

14.1 Acoplamiento en serie.- Veremos que es inestable e inútil.-

a) Inestable.- Sean dos alternadores 1 y 2 (fig.46) cada uno movido por su propio motor y conectados en serie.

Consideremos E_1 y E_2 en fase, pues así obtenemos el máximo de tensión. Las potencias entregadas por las máquinas serán:

$$P_1 = I x_{\text{proy}} E_1 \text{ sobre } I = I x_{AB}$$

$$P_2 = I x_{\text{proy}} E_2 \text{ sobre } I = I x_{BC}$$

Supongamos que la máquina 2 por una causa cualquiera aumenta su fuerza motriz. Entonces su rueda polar se adelantará respecto a la otra, por lo que E_2 tenderá a desplazarse a la posición E'_2 pudiéndose admitir que $|E_2| = |E'_2|$ ya que no ha variado la excitación. Como la tensión resultante $\bar{E}_1 + \bar{E}_2$ habrá girado algo, también lo hará I , pasando a la posición I' , admitiéndose que: $|I| = |I'|$ las po

tencias serán ahora:

$$P_1' = I' \times A' B' = I \times A' B' > P_1$$

$$P_2' = I' \times B' C' = I \times B' C' < P_2$$

se ve que P_1' es algo mayor que P_1 , mientras que P_2' es bastante menor que P_2 . De modo que aquella máquina que recibió más potencia motriz da menos potencia eléctrica, mientras que la otra, que no recibió exceso alguno, da más potencia eléctrica. El funcionamiento es inestable. Análogamente se probaría que si la máquina 2 disminuyera su fuerza motriz, su potencia eléctrica aumentaría y la de la 1 disminuiría. Se ve que es un funcionamiento inestable pues cualquier variación de fuerza motriz produce fenómenos que se magnifican hasta producirse el desacoplamiento de las máquinas.

La única posibilidad es que las máquinas se hallen sobre el mismo eje.-

b) Es inútil.- En efecto, si se desean acoplar varios alternadores para obtener más potencia, se pueden acoplar en paralelo que es montaje estable. La única razón que habría para hacer el montaje en serie y no en paralelo sería obtener una mayor tensión. Pero esto puede obtenerse por medio de transformadores. Por otra parte no podrían montar se en serie varios alternadores comunes, pues siendo la tensión total muy alta la aislación de los mismos no sería suficiente. Habría que utilizar alternadores con aislación especial.-

14.2 Acoplamiento en paralelo.

Este montaje es estable. Sean dos generadores 1 y 2 acoplados en paralelo (fig. 47). Las f.e.m.s. E_1 y E_2 estarán en oposición.

Supongamos que la máquina 2 atra-se por disminución de su par motor. Entonces E_2 se correrá a la posición E_2' , pudiéndose admitir que

$$|E_2| = |E_2'|$$

La f.e.m. E_1 y la E_2' tienen ahora una resultante E_r . Esta f.e.m. dará lugar a una corriente I_r de circulación en los alternadores. Estos se pueden considerar como cargas sélficas púras por lo que I_r estará 90° atrás

de E_r . Entonces I_r estará a menos de 90° de la f.e.m. E_1 , por lo que la máquina 1 funcionará como generador para esa corriente.

Por otra parte I_r está a menos de 90° de $-E_2'$, por lo que la 2, para dicha corriente trabajará como motor absorbiendo la potencia suministrada por la 1.-

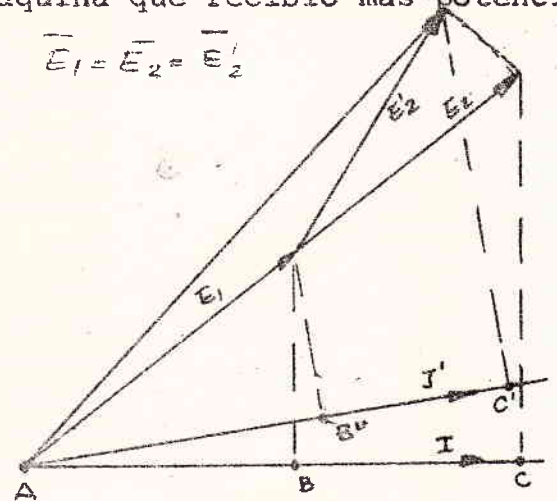


FIG. 46

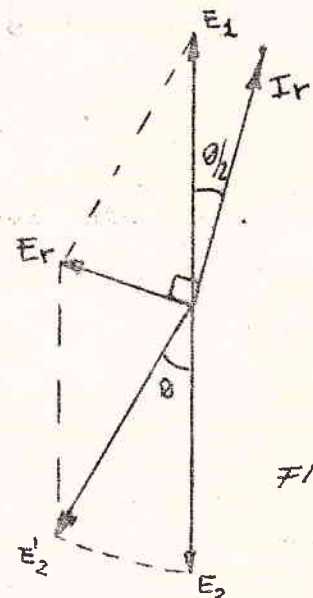


FIG. 47

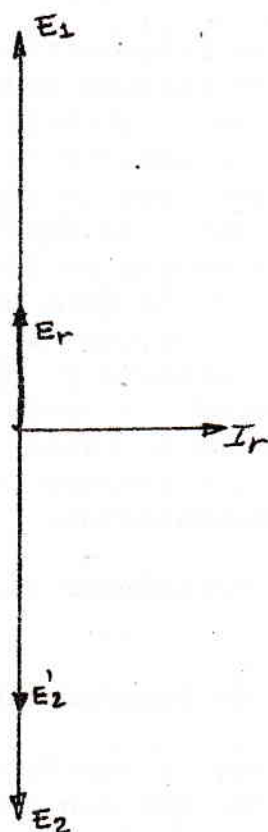


FIG. 48

El efecto de la corriente será descargar la máquina 2, tendiendo a acelerarla y a cargar la máquina 1, tendiendo a atrasarla. La I_r tiende pues a conservar iguales las velocidades de ambas máquinas, por cuya razón se le denomina corriente sincronizante. Se hace notar que el efecto de la corriente sin cronizante es completamente suficiente para mantener el sincronismo de los alternadores. El sistema es mecánicamente estable.

Supongamos que a la máquina 2 le baje la excitación. Entonces, E_2 bajará a E_2' , sin cambiar de dirección (fig. 48). E_1 y E_2' tendrán por resultante E_r que provocará la corriente de circulación I_r .

Esta corriente según se vió anteriormente es desmagnetizante para la 1 y magnetizante para la 2, tendiendo a equilibrar las f.e.ms. Este montaje es también estable frente a las variaciones de excitación.-

En las centrales eléctricas se prefiere tener varios alternadores pequeños y no uno solo grande. Las ventajas son las mismas que en la conexión de transformadores en paralelo: a) Se puede hacer funcionar siempre la instalación al máximo de rendimiento. b) Es necesario contar con menos potencia de reserva en caso de accidente.

14.3 Realización del acoplamiento de los alternadores en paralelo.

Los alternadores monofásicos se acoplan en forma análoga a los motores. Sean G_1 y G_2 a conectar en paralelo, estando G_2 ya conectado a la línea (fig. 44). Se regula la velocidad y la excitación de G_1 hasta que sea $E = V$ y su frecuencia lo más próxima posible a la de 2, lo que se averigua con las lámparas. Una vez conseguido ésto, en los instantes en que se apagan las lámparas o sea que las tensiones están en oposición, se cierra el interruptor y aparece una corriente sincronizante que lleva los dos alternadores a la misma frecuencia, quedando el paralelo establecido.

En las máquinas trifásicas habrá que verificar previamente que el orden de fases sea el mismo en los dos generadores.

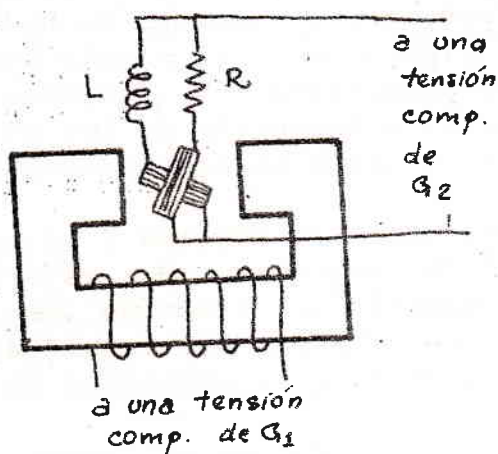


FIG. 49

Al efecto de la sincronización más perfecta, se utiliza el sincronoscopio, que es un fasímetro conectado como se ilustra en la fig. 49.- L es una gran self, R es una resistencia elevada. La aguja del instrumento indicará la diferencia de fases entre las tensiones compuestas observadas.

No siendo las frecuencias iguales, la aguja irá girando indicando la variación de la diferencia de fase. Será necesario regular la velocidad de G_1 hasta que la aguja gire con la mayor lentitud posible (a ese efecto la escala ya lleva escrito Acelerar en la zona en que se encuentra la aguja cuando la fase de G_1 está atrasada y Relentir en la otra). Cuando la aguja pase por cero (Tensiones en oposición) se podrá cerrar el interruptor, quedando el paralelo establecido.-

14.4 Distribución de la carga entre alternadores en paralelo.-

Sean dos máquinas 1 y 2 acopladas. El diagrama de funcionamiento visto desde el receptor es el de la fig. 50.

V es la tensión común mantenida constante por la acción de los reguladores de tensión. I_1 e I_2 las corrientes que dan cada máquina y sus f.e.ms. respectivas E_1 y E_2 . X_s son las reactancias sincrónicas que se suponen constantes.

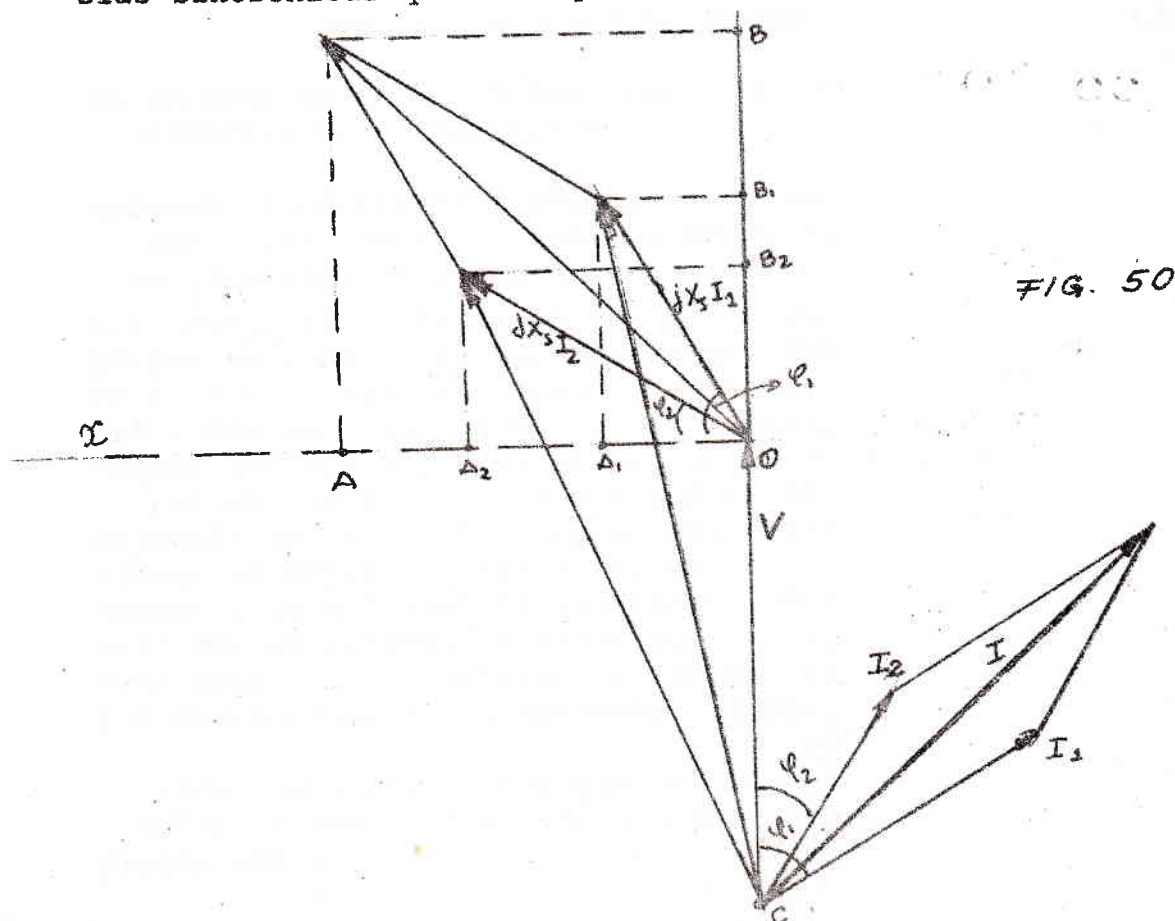


FIG. 50

Se ve claro que los segmentos OA_1 , OA_2 , OA son proporcionales a la potencia activa y los segmentos OB_1 , OB_2 , OB lo son a las potencias reactivas.

Cuando por la acción del regulador de velocidad (que actúa sobre el motor de arrastre por ej. admisión de la turbina) uno de los vectores E se adelanta o atrasa, girando con centro en C , variarán fundamentalmente las proyecciones sobre Ox , OA_1 , etc., o sea las potencias activas.

Cuando actúen los reguladores de tensión variando la magnitud de E_1 o E_2 variarán fundamentalmente las proyecciones sobre Oy , OB_1 , etc., o sea las potencias reactivas.-

Estas variaciones de carga son introducidas voluntariamente por el operador actuando sobre los parámetros que determinan la acción de los reguladores (de tensión y de velocidad). De modo que se puede actuar a voluntad sobre la distribución de cargas entre ambas máquinas. Este caso se refiere a dos máquinas, cuando se trate de más máquinas podrá reducirse un grupo de ellas a una máquina ficticia y considerar así el problema entre una máquina y el resto del conjunto.

14.5 Acción de los reguladores.

Los llamados reguladores de tensión o de velocidad son servomecanismos que están planeados para que la respuesta del grupo electrógeno resulte lineal frente a las variaciones de la potencia reactiva o activa respectivamente que demande el receptor.

En la fig. 51 se representa dicha respuesta para el caso del regulador de velocidad.

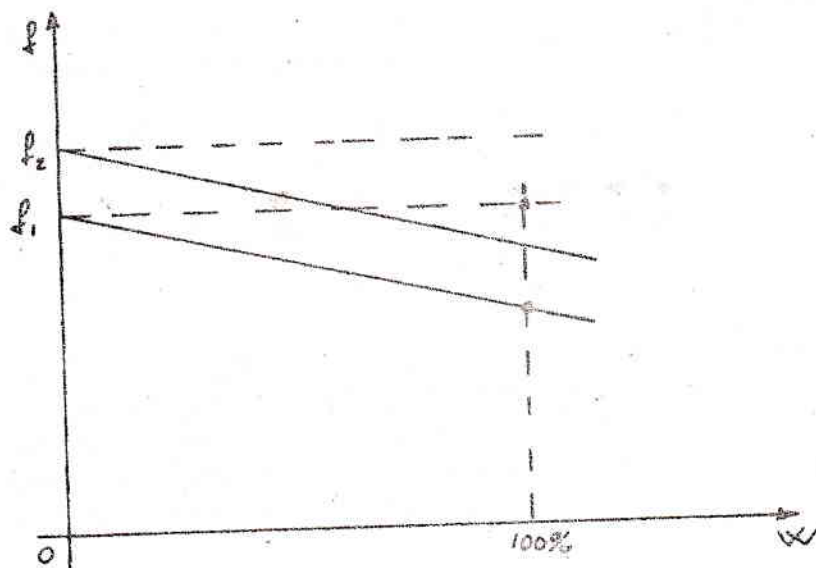
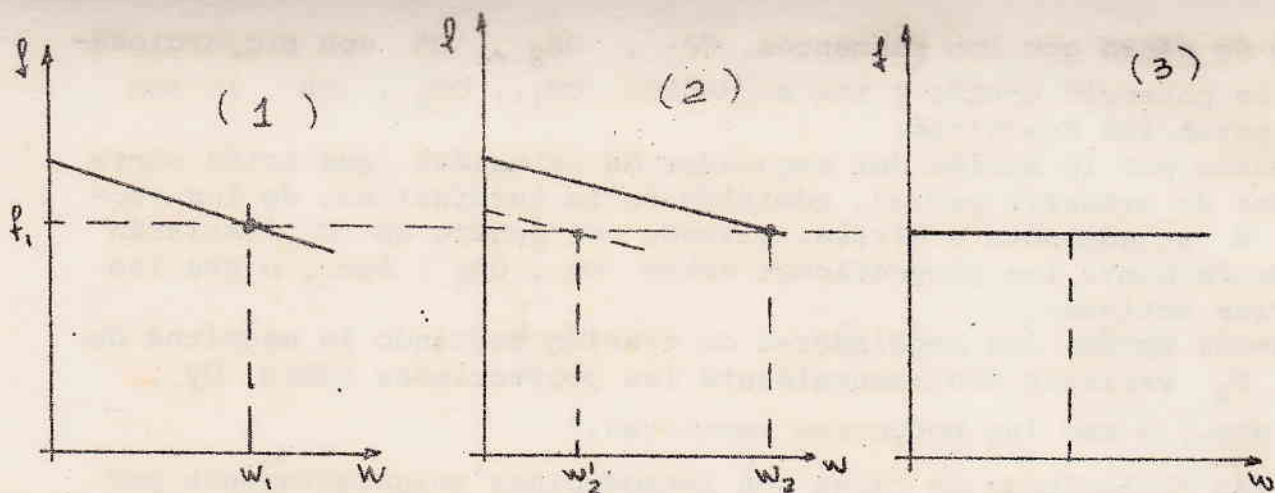


FIG. 51

La caída de velocidad entre vacío y plena carga se denomina estatismo, por ej. 5%. Sobre tal estatismo el operador puede actuar a voluntad hasta convertir dicha recta en horizontal (estatismo 0) o sea convertir la máquina en isócrona. Asimismo se puede actuar sobre la velocidad de vacío desplazando paralelamente las rectas.

En las redes hay que mantener constante la frecuencia. El estatismo permite distribuir la carga entre varias máquinas.-



La fig. 52 representa la situación de tres máquinas funcionando en paralelo, a la frecuencia f_1 . La 1 y 2 marchan con cargas fijas W_1 y W_2 que pueden ser nominales u otras fijadas de antemano; en cambio la 3 toma todas las variaciones de carga y mantiene la frecuencia. Cuando la 3 llega a plena carga se introducirá una cuarta máquina isócrona y se fijará W_3 dándole estatismo. Es obvio el proceso inverso. Lo es asimismo la transferencia de cargas de unas a otras máquinas, por ej. para bajar la carga de la 2, hasta bajar la recta como se indica en la figura y bajará su carga hasta W_2' , naturalmente que la diferencia $W_2 - W_2'$ la tomará la 3. En muchas centrales se prefiere que sea siempre una misma máquina la que funcione isócrona, en general por la razón de poseer un buen regulador.

Lo dicho antes vale para la distribución de la potencia reactiva Q . Los reguladores de tensión actúan en la misma forma con relación a la tensión. En muchos casos a los efectos de la regulación, se utilizan motores sincrónicos funcionando en vacío (sin carga en el eje) con estatismo Q para tomar la potencia reactiva.

BIBLIOGRAFIA

- Textos. Langsdorf, A. S.- Theory of Alternating Current Machinery.
 Liwshitz-Garik, M. and Whipple, C. C.- Electric Machinery.
 Vol. II. Alternating Current Machines.
 Kostenko, M. and Piotrovsky, L.- Electrical Machines.
 Vol. II. Alternating Current Machines.
- Textos de consulta:
 Potier, A.- Mémoires sur l'électricité et l'optique.
 Blondel, A.- Revista: "Industrie Electrique". 10 y 25 de Nov. y 25 Dic. 1899.
 Janet, Paul.- Lecons d'Electrotechnique. Vol. II.
 Mauduit, A.- Machines Electriques. Tomo II.
 Fallou, Jean.- Lecons d'Electrotechnique. Vol. II.
 Roth, Edouard.- Alternateurs et moteurs synchrones. Vol. II.

Bases de buenas relaciones

UN JEFE SOLAMENTE OBTIENE
RESULTADOS CON LA COLABORACION
DE SU PERSONAL

Informe a cada uno como progresas en su trabajo

Dígale lo que se espera de él.
Indíquele el modo de perfeccionarse.

Reconozca los méritos

Preste atención a los trabajos extraordinarios
o excepcionales.
Bríndele reconocimiento en el momento
oportuno.

Prevenga al personal de los cambios que le afecten

Si es posible, indíqueles los motivos.
Busque, encuentre, aplique todos los recursos
para hacer más fácil la aceptación del
cambio.

Utilice del mejor modo las aptitudes de cada uno

Busque las aptitudes no utilizadas.
No entorpezca nunca el ascenso de quien lo
merezca.

LOS HOMBRES DEBEN SER TRATADOS
SEGUN SU PERSONALIDAD

U.T.E. DEPTO. DE FORMACION

Como tratar un problema humano DETERMINE EL OBJETIVO

I.-Reúna los hechos

Revise todos los antecedentes.
Entérese de los reglamentos y costum-
bres aplicables.
Hable con los interesados.
Recoja las opiniones y sentimientos.
Asegúrese de que conoce toda la cuestión

II.-Considere y decida

Confronte y relacione los hechos.
Determine cuáles son los fundamen-
tales.
¿Cuáles son las acciones posibles?
Compruebe las acciones posibles con los
usos y reglamentos.
Considere el efecto de cada acción sobre
la persona, el grupo y la producción.
Compruebe si cada acción posible per-
mite alcanzar el objetivo.

No se precipite al decidir

III.-Actúe

¿Puede actuar Ud. independientemente?
¿Necesita la colaboración de otros?
¿Debe Ud. informar a su jefe?
Actúe en el momento y lugar más
oportuno.

No eluda su responsabilidad

IV.-Compruebe los resultados

¿Cuándo debe Ud. comenzar a com-
probar?
¿Con qué frecuencia y durante cuánto
tiempo?
Vigile los cambios de rendimiento, ac-
titudes y ambiente.
¿Ha alcanzado Ud. con su acción
el objetivo?

U.T.E. DEPTO. DE FORMACION

Como Prepararse para Instruir

I.-Haga un cuadro de formación

¿A QUIEN es preciso instruir?
¿Para QUE trabajo?
¿Para CUANDO?

II.-Haga hojas de análisis

Divida el trabajo en FASES IMPOR-
TANTES.
Determine en cada una los PUNTOS-
CLAVE.
"La seguridad es siempre un punto-
clave".

III.-Haga que todo esté a punto

Utiles adecuados.
El material indicado y en suficiente
cantidad.
Elementos auxiliares (croquis, planti-
llas, instrumentos de control).

IV.-Haga que el lugar de trabajo esté en buenas condiciones

Tal como el operario lo deberá conservar

| Fase importante | Punto-clave |
|---|---|
| Parte de la opera- ción que marca ló- gicamente una eta- pa en el progreso del trabajo por me- dio de un bien de- finido tipo de ac- ción diferenciado de los que los prece- den y de los que los siguen. | Todo lo que en una fase es preciso ob- servar para: —Obtener un buen resultado. —Evitar accidentes. —Facilitar el tra- bajo (ademanes, trucos, oportunidad de ac- ción, información es- pecial, etc.). |

U.T.E. DEPTO. DE FORMACION

COMO INSTRUIR

I.-PREPARE AL TRABAJADOR

Animelo; sea amable con él.
Infórmele sobre el trabajo.
Averigüe lo que sabe de él.
Despierte el interés por su trabajo.
Colóquele en posición conveniente.

II.-DEMUESTRE EL TRABAJO

Explique, muestre e ilustre (una a una)
las FASES IMPORTANTES.
Acentúe cada PUNTO CLAVE.
Instruya clara, completa y pacien-
temente, pero no más de lo que él
pueda asimilar.

III.-PONGALE A PRUEBA

Hágale hacer el trabajo; corrija sus
faltas.
Hágale explicar los PUNTOS - CLAVE
mientras repite el trabajo.
Hágale preguntas para asegurarse de
que lo ha comprendido.
Prosiga hasta estar seguro de que él
conoce el trabajo.

IV.-SIGALE EN LA PRACTICA

Hágale trabajar independientemente.
Indíquele quien le puede ayudar.
Visítele para ayudarlo y controlarlo.
Invítele a hacer preguntas.
Disminuya gradualmente ayuda y control.

**SI EL TRABAJADOR NO APRENDIO
EL INSTRUCTOR NO ENSEÑO
CORRECTAMENTE**

U.T.E. DEPTO. DE FORMACION